

VIABILIDAD TÉCNICA Y ECONÓMICA DEL USO DE PILOTES DE ACERO

JULIÁN BETANCUR RIVERA

Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero Civil

DIRECTOR DE TRABAJO DE GRADO

Luis Garza Vásquez

Ingeniero Civil. Magister en Ingeniería Civil



**UNIVERSIDAD EIA
INGENIERÍA CIVIL
ENVIGADO
2016**

CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCIÓN.....	9
1. PRELIMINARES.....	10
1.1 Planteamiento del problema	10
1.2 Objetivos del proyecto	10
1.2.1 Objetivo General.....	10
1.2.2 Objetivos Específicos	10
1.3 Marco de referencia.....	11
1.3.1 Antecedentes	11
1.3.2 Marco teórico.....	11
1.3.3 Marco metodológico	13
1.3.4 Marco legal.....	23
1.3.5 Marco económico	23
1.4 Hipótesis.....	24
2. METODOLOGÍA.....	25
3. DESARROJO DEL PROYECTO	26
3.1 Ejemplos ilustrativos.....	26
3.2 Etapa I. Establecimiento de los parámetros de diseño y construcción.	34
3.2.1 Caso de estudio.....	34
3.2.2 Consideraciones estructurales.....	36
3.2.3 Consideraciones del suelo.....	37
3.3 ETAPA II. Diseño de la cimentación para el caso de estudio usando pilotes de concreto y pilotes metálicos	40

3.3.1	Pilotes de concreto.....	43
3.3.2	Pilotes metálicos:.....	54
3.4	Cálculo de costos aproximados	67
3.4.1	Cimentación con pilotes de concreto	68
3.4.2	Cimentación con pilotes metálicos.....	69
4.	DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	70
5.	CONCLUSIONES Y CONSIDERACIONES FINALES	72
	BIBLIOGRAFÍA.....	74

TABLA DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1. Pilotes por punta. Fuente: (Garza Vásquez, 2000)	12
Ilustración 2. Pilotes por fricción. Fuente: (Garza Vásquez, 2000)	12
Ilustración 3. Pilotes por punta y por fricción. Fuente: (Garza Vásquez, 2000)	13
Ilustración 4. Piezas metálicas para para la protección e incremento de la superficie de contacto de los perfiles metálicos. Fuente: (Bowles, 1997)	14
Ilustración 5. Área de la sección transversal de los pilotes metálicos. Fuente: (Das, 2001)	14
Ilustración 6 (a). Área de la sección para suelos muy blandos o blandos. Fuente: (Gerdau, 2015)	15
Ilustración 7. Perfiles WF e IPN. Fuente: Elaboración propia.....	16
Ilustración 8. Dimensiones de perfil tubular. Fuente: Elaboración propia.	16
Ilustración 9. Dimensiones del perfil WF. Fuente: (Gerdau Corsa, n.d.)	17
Ilustración 10. Pilote metálico de más de 20 años. Fuente: (Gerdau Corsa, n.d.)	18
Ilustración 11. Capacidad de carga geotécnica. Fuente: (Gerdau Corsa, n.d.)	19
Ilustración 12. Calculo de capacidad de carga geotécnica. Fuente: (Gerdau Corsa, n.d.)	20
Ilustración 13. Ejemplo de pilote con sección decreciente en profundidad. Fuente: (Gerdau Corsa, n.d.).....	21
Ilustración 14. Empalmes de los perfiles. Fuente: (Gerdau Corsa, n.d.).....	22
Ilustración 15. Guía de madera para el hincado. Fuente: (Gerdau Corsa, n.d.)	23
Ilustración 16. Ejemplo de capacidad de carga en suelo granular. Fuente: Elaboración propia	26
Ilustración 17. Ejemplo de capacidad de carga en suelo cohesivo. Fuente: Elaboración propia	30
Ilustración 18. Ubicación de la bodega. Fuente: Google Maps.....	34
Ilustración 19. Vista en planta del diseño estructural de la bodega. Fuente: Planos de la bodega	35

Ilustración 20. Vista lateral del diseño estructural de la bodega. Fuente: Planos de la bodega.	35
Ilustración 21. Imagen del Puente- Grúa. Fuente: Planos de la bodega.....	36
Ilustración 22. Localización aproximada de los sondeos.....	37
Ilustración 23. Perfil estratigráfico. Fuente: Estudio de suelos	38
Ilustración 24. Imagen del modelo de la bodega en STAAD.Pro.....	41
Ilustración 25. Parámetros del suelo y profundidad de los pilotes de concreto. Fuente: Elaboración propia.....	43
Ilustración 26. Predimensionamiento del dado con cuatro pilotes. Fuente: Elaboración propia	44
Ilustración 27. Chequeo de cortante bidireccional. Fuente:(Garza Vásquez, 2000)	46
Ilustración 28. Área que aporta a la fuerza cortante. Fuente: Elaboración propia	47
Ilustración 29. Punzonamiento local. Fuente: Elaboración propia	48
Ilustración 30. Revisión cortante unidireccional. Fuente: (Garza Vásquez, 2000)	49
Ilustración 31. Zona donde se genera el cortante unidireccional. Fuente: Elaboración propia	50
Ilustración 32. Zona donde se desarrolla en momento máximo. Fuente: Elaboración propia	51
Ilustración 33. Distribución del refuerzo del dado. Fuente: Elaboración propia	52
Ilustración 34. Distribución aproximada del refuerzo en los pilotes. Fuente Elaboración propia	53
Ilustración 35. Distribución de dados y pilotes. Fuente: Elaboración propia	53
Ilustración 36. Parámetros del suelo y profundidad de los pilotes metálicos. Fuente: Elaboración propia.....	54
Ilustración 37. Predimensionamiento del dado con dos pilotes metálicos. Fuente: Elaboración propia.....	56
Ilustración 38. Brazos de palanca. Fuente: elaboración propia	57
Ilustración 39. Área que aporta a la fuerza cortante. Fuente: Elaboración propia	58

Ilustración 40. Punzonamiento local. Fuente: Elaboración propia	60
Ilustración 41. Zona donde se genera el cortante unidireccional. Fuente: Elaboración propia	61
Ilustración 42. Zona donde se desarrolla en momento máximo. Fuente: Elaboración propia	62
Ilustración 43. Refuerzo de los dados con dos pilotes. Fuente: Elaboración propia	63
Ilustración 44. Detalle de estribos. Fuente: Elaboración propia.....	65
Ilustración 45. Detalle de anclaje del pilote al dado. Fuente: Elaboración propia	65
Ilustración 46. Distribución de dados y pilotes metálicos. Fuente: Elaboración propia	67

RESUMEN

En este trabajo se plantea la pregunta: teniendo en cuenta que países como Colombia, Brasil y México comparten rasgos similares en los métodos ingenieriles, ¿Por qué en Colombia no se usan los pilotes metálicos como sistema de fundación si esta práctica es comúnmente utilizada en los otros dos países? Para solucionar este problema el autor realiza el diseño de las cimentaciones de una bodega utilizando pilotes de acero y pilotes prefabricados de concreto (comúnmente utilizados en el medio), calculando los costos de ambos sistemas. Esto permite analizar desde una perspectiva técnica y económica las razones para el uso limitado de este material en los sistemas de fundación para los proyectos de ingeniería locales.

También se hace un análisis a través de ejemplos ilustrativos de la influencia de los materiales para el cálculo de la capacidad geotécnica de los pilotes de acuerdo al tipo de suelo (cohesivos o friccionantes).

El trabajo cuenta con todas las herramientas para obtener los parámetros de diseño necesarios, tanto con el estudio de suelos que provee las características de los estratos que resisten las cimentaciones; como el modelo de la superestructura de donde se obtienen las cargas a soportar.

Teniendo presente las ventajas que poseen ambos materiales, se realizan los diseños de la cimentación de la manera más óptima posible obteniendo diferentes distribuciones de los pilotes de acuerdo con el material. Para ambos sistemas se realiza un análisis de costos donde se evidencian grandes diferencias en el valor económico de los materiales.

Con los diseños y los análisis económicos realizados se llega a la conclusión de que para el caso de estudio expuesto, la cimentación con pilotes metálicos es técnicamente viable desde el punto de vista del diseño, y es económicamente inviable por los altos costos del material.

Palabras clave: Cimentaciones profundas, acero, pilotes

ABSTRACT

This paper addresses the following question: taking into account that countries like Colombia, Brazil, and Mexico share similar traits regarding their engineering methods, why does Colombia does not use the metallic piles foundation systems, if such practice is commonly used in the other two countries? In order to answer this issue, the author designs a warehouse foundation system, comparing the usage of steel profiles and concrete precast piles, which are traditionally used, paralleling the associated costs to such practices. The result allows to analyze from a technic and also economic perspective the reasons for the limited use of the metallic material in foundations systems for local engineering projects.

This paper also explains, through illustrative examples, the influence of the materials used to calculate the geotechnical capacity of the piles, according to the type of soil (cohesive or frictioning).

This study uses all the needed tools to obtain the required design parameters, the ground study that provides the characteristics of the soil strata holding the foundations, as well as the superstructure model, which gives the information regarding the loads weight that must be face by the piles.

In order to optimize each of the materials advantages, different designs for the piles systems were made. A costs analysis will be provided for each type of foundation, in order to illustrate vast economic differences between the materials subject to this study.

After studying the designs and the referred economic analysis, this paper reaches the following conclusion: metallic piles foundation systems are technically viable, but their high costs make them economically unviable.

Key words: deep foundations, steel, piles.

INTRODUCCIÓN

“Las cargas sobre las estructuras y su peso propio se pueden concebir en el diseño como un conjunto de fuerzas que es siempre necesario transmitir o trasladar a una zona de los mantos de suelo o roca” (Delgado Vargas, 1996). A pesar de su costo, el uso de cimentaciones profundas es a menudo necesario para garantizar la seguridad de una estructura bajo las siguientes condiciones (Das, 2001):

- Estratos superficiales débiles y compresibles.
- Estructura sometida a cargas horizontales que someten la cimentación a esfuerzos de flexión.
- Suelos expansivos y colapsables que según su humedad generan esfuerzos por la expansión y contracción, que las cimentaciones superficiales no son capaces de resistir.
- Estructuras que bajo ciertas condiciones de carga presenten levantamiento en las cimentación (torres de transmisión, plataformas costeras, entre otras).
- Estribos de puentes sometidos a condiciones de erosión que pueden dañar fácilmente las cimentaciones superficiales.

Los pilotes son miembros estructurales hechos de acero, concreto y/o madera y son usados como un tipo de cimentación profunda. Su diámetro es pequeño (por lo general menor a 35 cm) y suelen ser hincados o excavados y vaciados in-situ por medio de maquinaria. (Das, 2001)

El acero es un material que presenta ciertas características que pueden aprovecharse en la construcción, tal como su alta resistencia mecánica, tanto a tracción como compresión; además tiene un peso liviano en comparación con el hormigón armado; es un material dúctil que permite grandes deformaciones antes de la falla, es de fácil manejo y la precisión y la calidad del material está garantizada desde su producción. (Coruña, 2010)

En este trabajo de grado se realizará un análisis de la viabilidad del uso del acero como material para los pilotes hincados en Colombia.

Para esto se tendrá como referencia una bodega ubicada en la ciudad de Medellín en la calle 73 No. 51C – 35, de la empresa Forjas Bolívar, la cual cuenta con un sistema de cimentación profunda en pilotes prefabricados de concreto e hincados. Se realizará un diseño alternativo para la cimentación de esta bodega y se hará una confrontación entre los dos materiales (acero y concreto) desde el diseño, la construcción y factores como mantenimiento, ventajas, desventajas y costos de ambas alternativas.

1. PRELIMINARES

1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En países cercanos a Colombia, como Brasil y México, el uso de pilotes de acero “es una realidad” para todo tipo de obras de ingeniería y compiten técnica y económicamente con otros tipos de materiales usados para las cimentaciones profundas. (Gerdau Corsa, n.d.)

Es de conocimiento general que en nuestro país el acero no es comúnmente usado como material para elementos de cimentaciones profundas. De acuerdo con el ingeniero Luis Garza Vásquez (2015), en Colombia no se utiliza este material para estos fines por *ignorancia* del medio, ya que según él, podría resultar, no solo económicamente viable, sino más eficiente que la utilización de otros tipos de fundación.

Se debe realizar una evaluación sobre la viabilidad del uso de pilotes en acero, comparándola con el sistema convencional usado en Colombia de pilotes prefabricados de concreto, de esta forma poder determinar la utilidad del acero como material para las cimentaciones.

Se debe aclarar que las conclusiones obtenidas en este trabajo de grado, solo son aplicables al caso en estudio ya que cada proyecto tiene características propias que los hace únicos. Sin embargo estas pueden ser tomadas como referencia para futuros estudios sobre el tema.

1.2 OBJETIVOS DEL PROYECTO

1.2.1 Objetivo General

Estimar la viabilidad del uso de pilotes metálicos, mediante una comparación de costos, comportamiento mecánico y métodos constructivos, frente al sistema de pilotes prefabricados en concreto para un caso de estudio de una obra ya existente.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Establecer los parámetros del diseño y construcción de las cimentaciones del proyecto a analizar, incluyendo caracterización del suelo, cargas solicitadas, métodos de cálculo, métodos constructivos, costos y consideraciones generales para tener una base comparativa.
- Diseñar las cimentaciones para el caso de estudio usando el sistema de pilotes metálicos implementando la metodología seleccionada anteriormente.
- Realizar un análisis comparativo entre el sistema usado en el proyecto (pilotes prefabricados en concreto) y el sistema de pilotes metálicos, considerando el diseño, los costos, métodos constructivos y el comportamiento de cada sistema.

1.3 MARCO DE REFERENCIA

1.3.1 Antecedentes

En Colombia ha sido limitado el uso de pilotes de acero. Son pocos los proyectos de conocimiento público donde se ha implementado este sistema. Según el Instituto Colombiano de la Construcción con Acero (2015), en Buenaventura se planea construir un proyecto llamado Agua Dulce al frente del actual puerto de la Sociedad Portuaria. La firma consultora modificó el diseño original cambiando los pilotes originalmente de concreto pretensado a pilotes de acero de sección circular compuesta.

Los pilotes de acero son cada vez más utilizados en el mundo debido a su bajo peso y fácil maniobrabilidad además de que por su área muy pequeña son mucho más fáciles de hincar, sobre todo en zonas costeras y en general en materiales granulares. Esta misma característica hace que el desplazamiento de volúmenes de suelo sea reducido, de tal manera que se evita el rehincado de pilotes debido a que la hinca produce que los pilotes vecinos tiendan a salir.

A nivel internacional, este sistema es comúnmente implementado en todo tipo de proyectos, tanto en la construcción industrial como en edificios de múltiples pisos, puentes, viaductos, puertos, torres de transmisión, estructuras de contención, etc. (Gerdau Corsa, n.d.)

En países cercanos a Colombia como Brasil y México, se ha avanzado mucho en el desarrollo de ideas para implementar este sistema, lo que los ubica en un nivel más alto en este aspecto con respecto a los otros países latinoamericanos.

Gerdau Açominas es una empresa multinacional brasileña que produce todo tipo de productos para la construcción en acero, tiene presencia en la mayoría de países latinoamericanos e invierte mucho en el campo de la investigación con el fin de promover el uso de sus productos en todos los países. Para el diseño y las consideraciones que se deben tener con el trabajo, se tendrá como fuente de información el “MANUAL DE PILOTES METÁLICOS” de la empresa mencionada en su sede en México.

1.3.2 Marco teórico

De acuerdo a su forma de trabajo los pilotes se pueden clasificar como de punta, fricción o punta y fricción, de acuerdo a la fuente dominante de resistencia.

○ Pilotes de Punta

Cuando un pilote debe alcanzar un estrato de apoyo de resistencia considerable en comparación a los estratos superiores, tiene de todas maneras aportes a la resistencia tanto por punta como por fricción. Teniendo en cuenta que para movilizar la resistencia por fricción se requiere desplazamiento relativo entre el pilote y el suelo y que la rigidez del suelo por encima de la punta sería relativamente baja, como para que se allá justificado buscar como apoyo un estrato inferior, podríamos asumir que las curvas esfuerzo deformación de ambas fuentes de resistencia serían similares a la de la Ilustración 1. Pilotes por punta. Fuente: (Garza Vásquez, 2000), como puede apreciarse, para que se desarrolle la resistencia última a fricción se requeriría que el pilote falle en la punta. En otras palabras,

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

las resistencias máximas por punta y fricción no corresponden a la misma deformación. La única forma de sumar las resistencias de punta y fricción es hacer una prueba con un pilote en el que el fuste y la punta tengan deformaciones independientes, de manera que cuando penetre la punta la funda exterior no se mueva y cuando se hinque la funda exterior la punta no se mueva, de esta manera se podrían obtener las curvas de esfuerzo deformación distintas para cada fuente de resistencia, y por lo tanto sumar a la resistencia máxima en la punta la proporción correspondiente de resistencia a fricción para la deformación de ruptura en la punta, entonces aplicar el consiguiente factor de seguridad. Puesto que este tipo de prueba no es frecuente, una hipótesis simplificadora conservadora y quizás no muy alejada de la realidad sería despreciar el efecto de la fricción y considerar que el único aporte de resistencia corresponde a la punta del pilote.

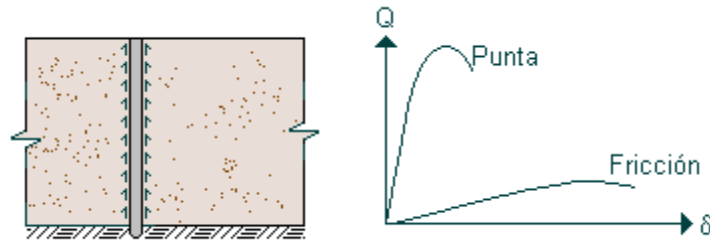


Ilustración 1. Pilotes por punta. Fuente: (Garza Vásquez, 2000)

○ **Pilotes de Fricción**

Si el pilote está embebido en su totalidad en un estrato de baja a media rigidez, sin alcanzar un estrato que aumente su rigidez drásticamente, el aporte de la fricción en el fuste aplicado sobre el área lateral del pilote es considerablemente mayor que el aporte de la resistencia por punta aplicada a un área relativamente pequeña. En este caso (ver Ilustración 2. Pilotes por fricción. Fuente: (Garza Vásquez, 2000)), el que puede despreciarse es el efecto de la punta, ya que al nivel de deformaciones que se requiere para alcanzar la resistencia a la fricción, el aporte de la punta puede despreciarse.

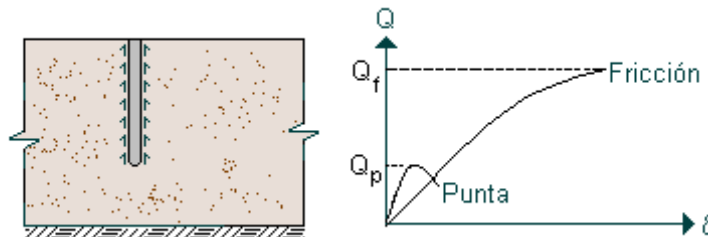


Ilustración 2. Pilotes por fricción. Fuente: (Garza Vásquez, 2000)

○ **Pilotes de Punta y Fricción**

En el caso en el que el pilote esté empotrado una longitud apreciable en el estrato resistente implica que dado que la resistencia a fricción en la zona de empotramiento se desarrolle en el mismo material de la punta, se puede considerar la suma de los aportes de punta y fricción, pero únicamente en la zona de empotramiento, ya que como en el caso de los

pilotes de punta, la fricción en un suelo de poca rigidez puede despreciarse. Este caso se muestra en la Ilustración 3. Pilotes por punta y por fricción. Fuente: (Garza Vásquez, 2000)

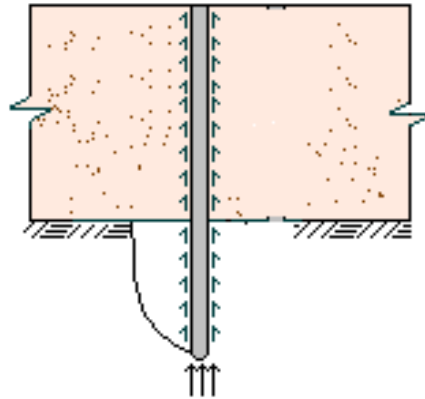


Ilustración 3. Pilotes por punta y por fricción. Fuente: (Garza Vásquez, 2000)

1.3.3 Marco metodológico

En esta sección se presentan conceptos y elementos que son importantes para el diseño de los pilotes metálicos. Para esto se tendrá como referencia principalmente la NBR 6122/1996 de la ABNT (Asociación Brasileira de Normas Técnicas) ya que en Colombia es difícil encontrar estudios técnicos sobre el uso de este sistema, mientras que en Brasil se ha avanzado al respecto, por lo que la mayor parte de la bibliografía consultada proviene de este país.

○ Perfil

Para la selección del perfil metálico a utilizar como pilote se debe analizar con anterioridad aspectos importantes como: si los pilotes van a trabajar por punta o por fricción. En el caso de que los pilotes trabajen por punta se debe tener en cuenta que se necesita tener la mayor área posible en la base para que la superficie de contacto con el material del suelo que va a recibir el pilote sea la mayor posible. Para esto, se puede adaptar piezas de metal que cumplen la función tanto de proteger la punta en el momento del hincado como de generar más superficie de contacto. Algunos ejemplos de estas piezas se muestran en la Ilustración 4. Piezas metálicas para para la protección e incremento de la superficie de contacto de los perfiles metálicos. En el caso de utilizar estas piezas, se deben realizar los respectivos chequeos para prevenir una posible falla local de estas.

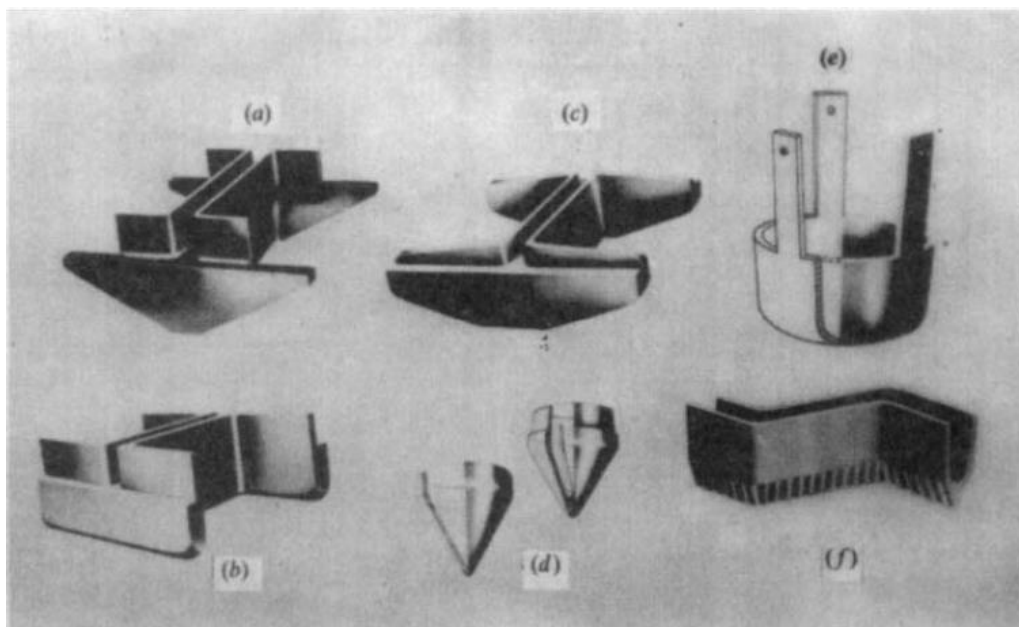


Ilustración 4. Piezas metálicas para la protección e incremento de la superficie de contacto de los perfiles metálicos. Fuente: (Bowles, 1997)

Para el cálculo de del área de la sección transversal en pilotes H, I o tubular, se debe tener en cuenta tanto el área del perfil como el área del tapón del suelo como se muestra en la Ilustración 5. Área de la sección transversal de los pilotes metálicos. Fuente: (Das, 2001).

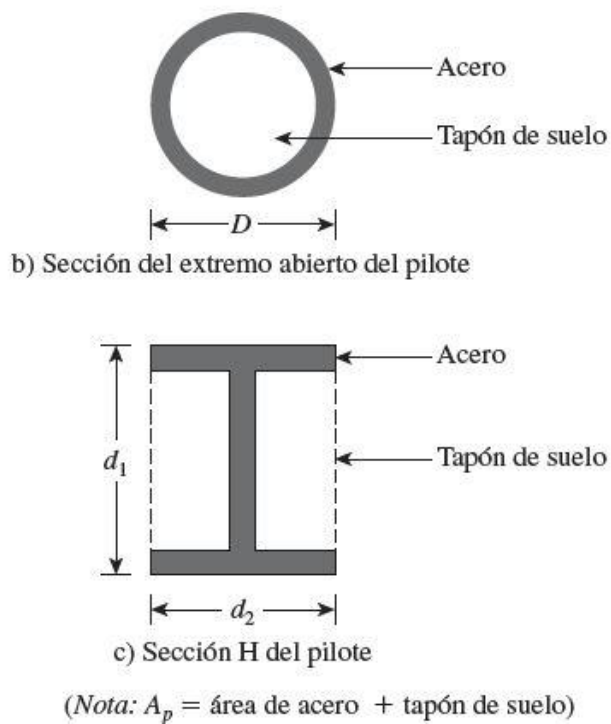


Ilustración 5. Área de la sección transversal de los pilotes metálicos. Fuente: (Das, 2001)

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

En el manual de pilotes metálicos de la empresa Gerdau (2015) se aclara que se debe tener en cuenta para el cálculo del área de la sección transversal, la *consistencia del suelo*, es decir:

Para los casos donde el suelo se encuentre caracterizado entre “muy blando” y “blando”. El área de la punta es igual a:

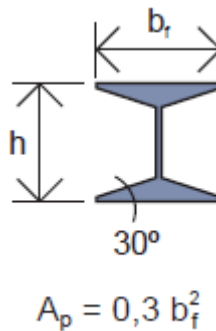


Ilustración 6 (a). Área de la sección para suelos muy blandos o blandos. Fuente: (Gerdau, 2015)

Para los casos donde el suelo se encuentre caracterizado entre “medio” y “firme”. El área de la punta es igual a:

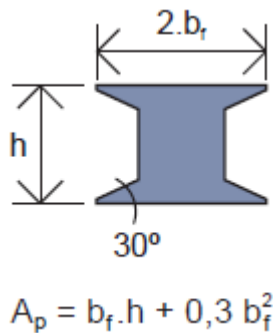


Ilustración 6 (b). Área de la sección para suelos de consistencia media o firme. Fuente: (Gerdau, 2015)

Para los casos donde el suelo sea de consistencia “muy firme” o “dura”, El área se calcula como:

$$A_p = b_f \cdot h$$

En el caso cuando las pilas trabajan por fricción es recomendable el uso de pilotes con sección en I o H de acero al carbono de alta resistencia, estos tienen la capacidad de resistir fuerzas axiales y momentos flectores. Estos perfiles son de tipo WF, es decir tienen sus alas paralelas, a diferencia de los perfiles IPN en los cuales el espesor de las alas es variable como se muestra en la Ilustración 7. Perfiles WF e IPN.

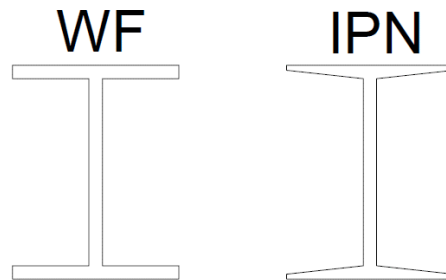


Ilustración 7. Perfiles WF e IPN. Fuente: Elaboración propia.

En Colombia estos se encuentran en longitudes de hasta 12 m y tienen diversos usos en la ingeniería civil como por ejemplo, en edificaciones, para pórticos, cerchas, vigas, viguetas, riostras, columnas, soportes, etc. (aceros DIACO, n.d.)

Las dimensiones de la sección transversal de un perfil tubular se definen en la Ilustración 8. Dimensiones de perfil tubular. Fuente: Elaboración propia..

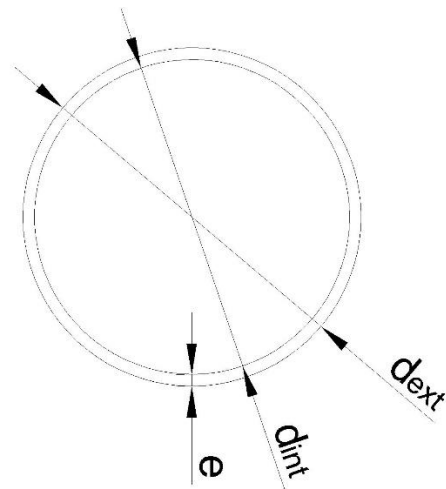


Ilustración 8. Dimensiones de perfil tubular. Fuente: Elaboración propia.

Las dimensiones la sección transversal de un perfil WF se define en la Ilustración 9. Dimensiones del perfil WF..

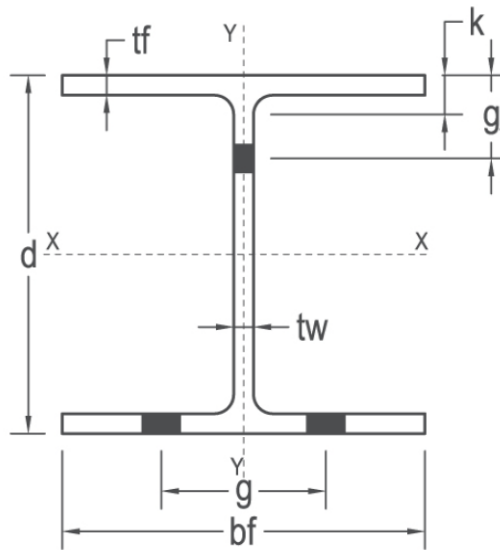


Ilustración 9. Dimensiones del perfil WF. Fuente: (Gerdau Corsa, n.d.)

Donde:

- b_f : Ancho del Patín
- d : Altura de la sección transversal del perfil
- t_f : Espesor del ala (Patín) del perfil
- t_w : Espesor del alma del perfil
- k : Repique

○ Corrosión

La RAE define corrosión como la destrucción paulatina de los cuerpos metálicos por acción de agentes externos, persista o no su forma.

En la Ilustración 10. Pilote metálico de más de 20 años. Fuente: (Gerdau Corsa, n.d.) se muestra un pilote de que tiene más de 20 años enterrado. La durabilidad de los pilotes en acero ha excedido todas las expectativas teóricas, desde hace más de 120 años se vienen utilizando estos elementos y su respuesta ha sido buena, especialmente en suelos agresivos o contaminados con químicos, no existe ningún caso en la literatura donde se relate una reducción de la capacidad estructural causada por este fenómeno. (Gerdau Corsa, n.d.)

Para que se presente corrosión en el acero es necesaria la presencia tanto de agua como de oxígeno, y aunque es frecuente encontrar agua en los suelos, normalmente no hay cantidades considerables del gas, por lo que el acero no se corroe fácilmente. Otras propiedades de los suelos, tales como drenaje, resistividad eléctrica o composición química no son de gran valía en la determinación de la corrosividad. (Gerdau Corsa, n.d.)

Para considerar este factor, se debe hacer una reducción al perímetro del perfil de 1,0 mm debido a la corrosión preconcebida por la NBR 6122 / 1996^a, lo que implica una reducción del área de la sección transversal obteniendo un área neta (A_s').

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.



Ilustración 10. Pilote metálico de más de 20 años. Fuente: (Gerdau Corsa, n.d.)

En todo caso, siempre existe la posibilidad de someterlos a un sistema de protección anticorrosiva, tal como el galvanizado, o la aplicación de esquemas de pintura, que deben incluir la especificación de tratamientos de superficie (Sand Blasting grado comercial SP-6, casi blanco SP-5 y Blanco SP-10), aplicación de pintura anticorrosiva, barreras y esmalte de tipo epóxico. (ISO-12944-5, 2002)

○ **Dimensionamiento estructural**

Pandeo

Se define como una deformación excesiva hacia los costados de un elemento sometido a compresión, se presenta en elementos esbeltos.

En pilotes que se encuentran totalmente enterrados, no suele ocurrir pandeo por lo tanto solo se debe revisar este fenómeno en los pilotes que sobrepasan el nivel del terreno, considerando una eventual erosión del suelo o que este sea muy blando.

Capacidad de carga estructural

La carga estructural admisible según la NBR 8800 se puede calcular como:

$$P = \frac{\gamma_f}{\gamma_p} \cdot (\rho \cdot Q \cdot A_s' \cdot f_y)$$

Donde:

- P : Carga estructural admisible del pilote
- γ_f : Coeficiente de ponderación de las resistencias
- γ_p : Coeficiente de ponderación de las acciones
- ρ : Coeficiente de reducción por pandeo (sin pandeo $\rho = 1$)
- Q : Reducción en la capacidad global del elemento

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

A_s' : Área neta de la sección transversal del perfil
 f_y : Límite de fluencia del acero

Según la NBR 8800, las secciones que cumplen con la estabilidad local, se pueden considerar totalmente efectivas por lo tanto $Q = 1.0$. Para verificar estabilidad local se utiliza:

Para el patín:

$$\gamma_f = \frac{b_f}{2t_f} < 0.55 * \sqrt{\frac{E}{f_y}}$$

Para el alma:

$$\gamma_w = \frac{d'}{t_w} < 1.47 * \sqrt{\frac{E}{f_y}}$$

Donde:

E : Módulo de elasticidad del material del pilote

d' : Altura efectiva del alma

Los perfiles que se utilizarán para el estudio atienden la estabilidad local por lo tanto ($Q = 1.0$)

El valor obtenido de la fórmula de carga estructural admisible debe ser menor o igual a la carga geotécnica admisible.

○ Capacidad de carga geotécnica

La carga estructural admisible corresponde a la resistencia estructural del pilote. Por lo tanto se debe buscar una longitud de pilote tal que el suelo sea capaz de resistir esta carga. Los distintos casos de este fenómeno se muestran en la Ilustración 11. Capacidad de carga geotécnica. En el primer caso se analizan dos perfiles de igual sección transversal y distinta profundidad; se ve que el que alcanza mayor profundidad tiene más capacidad de carga. En el segundo caso se muestran dos perfiles de sección transversal distinta e igual profundidad; se evidencia que el que tiene mayor sección transversal soporta mayor carga.

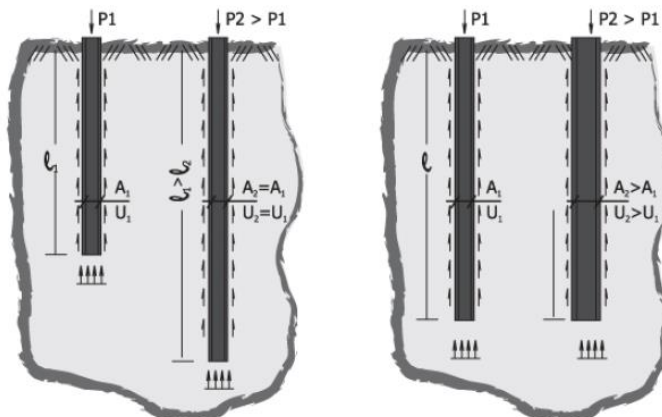


Ilustración 11. Capacidad de carga geotécnica. Fuente: (Gerdau Corsa, n.d.)

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

La capacidad de carga geotécnica se calcula como:

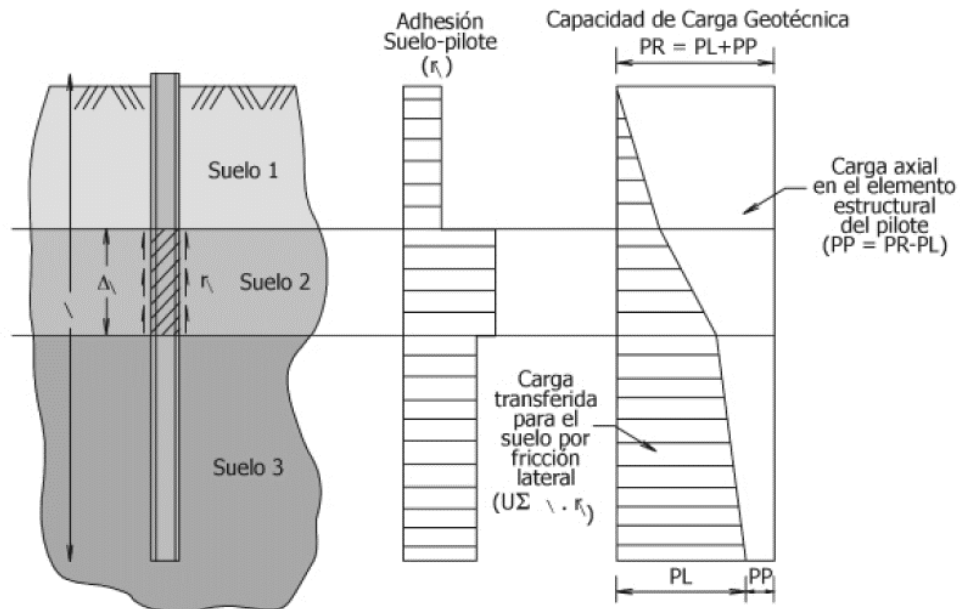


Ilustración 12. Cálculo de capacidad de carga geotécnica. Fuente: (Gerdau Corsa, n.d.)

$$PR = PL + PP$$

$$PL = U * \sum \Delta L * r_L$$

$$PP = A_p * r_p$$

Donde:

- PR : Capacidad de carga geotécnica
- PL : Capacidad de carga por fricción lateral a lo largo del fuste del pilote
- PP : Capacidad de carga debido a la punta del pilote
- U : Perímetro de la sección transversal del pilote en el tramo ΔL
- ΔL : Espesor del estrato de suelo
- r_L : Factor de adhesión suelo-pilote
- A_p : Área de la punta del pilote
- r_p : Factor de carga por punta

En algunas fuentes bibliográficas las variables están simbolizadas con otras letras.

Los factores r_L y r_p son los que dependen de los parámetros del suelo ya que el resto de variables son geométricas y dependen del perfil de acero.

Para alcanzar economía en el diseño se debe optimizar este cálculo, teniendo presente que tanto el área transversal como la profundidad son determinantes para el diseño.

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

- **Pilotes metálicos de sección decreciente con la profundidad**

En la Ilustración 12. Calculo de capacidad de carga geotécnica se evidencia que hay una disminución de la carga axial en función de la profundidad del pilote. Lo que implica una oportunidad para optimizar y economizar en el diseño de los pilotes metálicos, ya que el pilote no requiere una sección constante, esto permite una disminución sustancial en el peso del elemento siempre y cuando se cumpla con que las secciones puedan aguantar la carga axial a las que están sometidas.

Este concepto lo empezó a utilizar el equipo técnico de Gerdau Açominas (2006), quienes descubrieron que se puede alcanzar una capacidad de carga idéntica a un perfil constante con un ahorro sustancial.

La idea se basa en utilizar perfiles del mismo grupo que compongan el pilote de sección transversal decreciente. Los perfiles del mismo grupo son aquellos que tienen la misma altura nominal y varían en los espesores de alma y patín, esto genera una variación en la masa y el perímetro total. De esta forma, es posible unir los diferentes perfiles con facilidad.

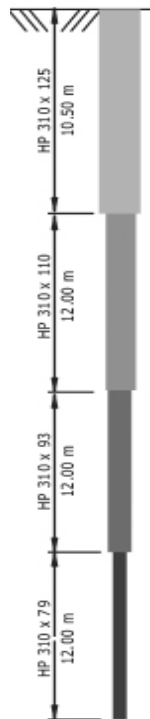


Ilustración 13. Ejemplo de pilote con sección decreciente en profundidad. Fuente: (Gerdau Corsa, n.d.)

- **Empalmes de los perfiles**

Como se mencionó antes, en Colombia las longitudes comerciales de los perfiles en acero son hasta los 12 m, esto implica que para muchos casos donde el diseño requiera un pilote de más de 12 se deba realizar una unión entre los perfiles. (aceros DIACO, n.d.). También en los casos donde los pilotes son de sección decreciente en profundidad se debe realizar el empalme entre los perfiles.

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

Los empalmes se realizan a través de placas que se fabrican con los sobrantes de los perfiles. Se deben soldar las placas a los dos elementos que se van a conectar tanto por las dos paredes del alma como por las alas. Y las longitudes deben cumplir con lo que aparece en la Ilustración 14. Empalmes de los perfiles.

El proceso consiste en soldar las placas al elemento superior y unir esto con el elemento inferior previamente hincado en el suelo, verificando su alineación y correcto posicionamiento.

Ilustración 14. Empalmes de los perfiles

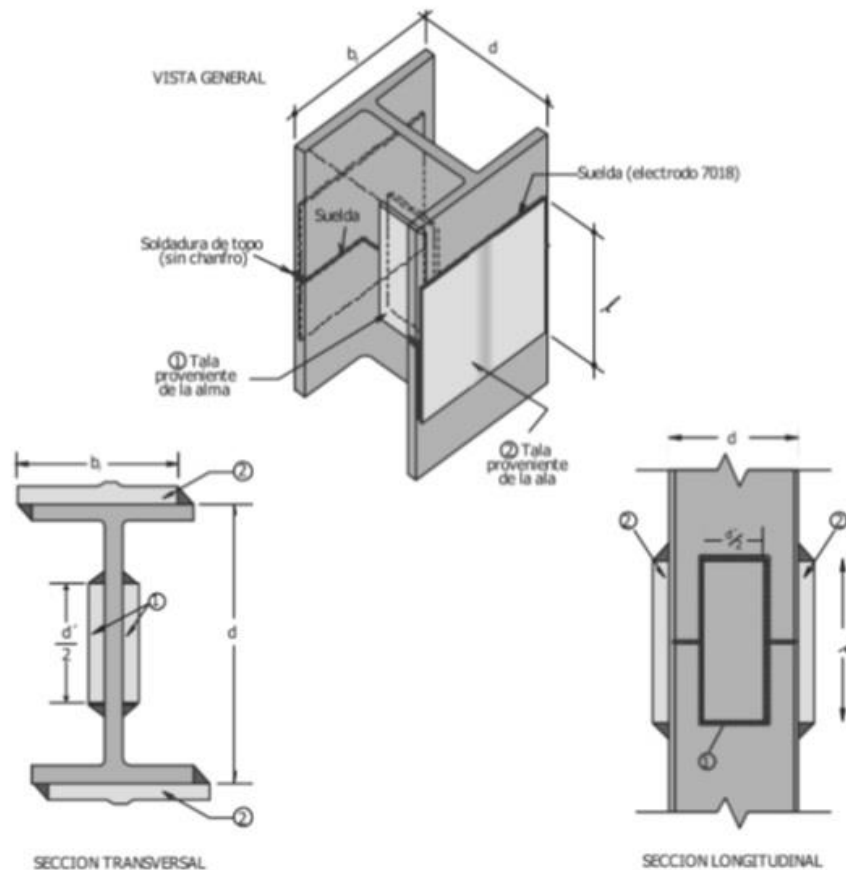


Ilustración 14. Empalmes de los perfiles. Fuente: (Gerdau Corsa, n.d.)

○ **Controles de la capacidad de carga durante el proceso de hincado**

Los pilotes metálicos pueden ser hincados con la utilización de martillos de caída libre, hidráulicos, a diésel, neumáticos y vibratorios. La elección de uno u otro martillo depende, principalmente, de las características del suelo, de la longitud del pilote y del nivel de ruido y vibración. De la buena elección del martillo resultará un mejor desempeño del proceso de hincado en particular en cuanto a las vibraciones y al ruido que hoy día, en centros urbanos, acaban siendo la condicionante para la elección del tipo de cimentación. (Gerdau Corsa, n.d.)

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

Cualquiera que sea el martillo empleado, el control de hincado es hecho, tradicionalmente, por el rechazo, por el repique y, en otras obras más importantes, por el ensayo de carga dinámica.

Para garantizar que el perfil sea hincado en la posición de proyecto se debe proveer una guía en madera “enterrada” según se muestra en la Ilustración 15. Guía de madera para el hincado.

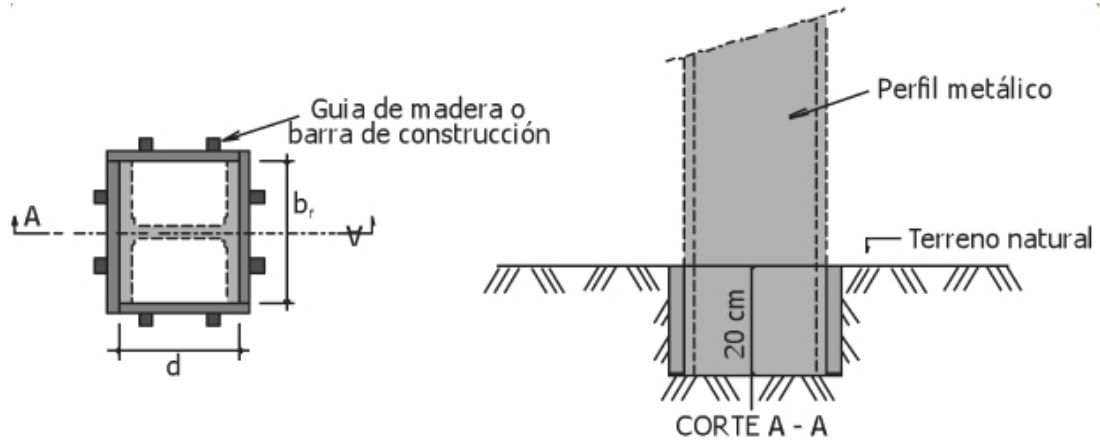


Ilustración 15. Guía de madera para el hincado. Fuente: (Gerdau Corsa, n.d.)

Rechazo

Se mide el número de golpes necesarios para alcanzar cierta profundidad.

Repique

Se propaga una onda generada a partir de un golpe y se grafica el comportamiento de esta.

Ensayo de carga dinámica

Se propaga una onda generada a partir de un golpe y se mide a partir de instrumentación instalada en el pilote la aceleración de la onda propagada.

1.3.4 Marco legal

El diseño de los pilotes metálicos debe cumplir con todo lo establecido en el título H de la NSR-10 que incluye: Capacidad admisible, profundidad de cimentación, factores de seguridad indirectos, asentamientos, efectos de los asentamientos y lo concerniente al diseño estructural de la cimentación.

1.3.5 Marco económico

El trabajo tendrá como finalidad realizar un análisis de costos con el fin de determinar la viabilidad del uso de pilotes hincados en un caso de estudio. Según el ingeniero Juan Esteban Londoño, gerente de la empresa “Constructora Precomprimidos S.A.”, el hincado

de pilotes metálicos se puede realizar con el mismo equipo usado para el hincado de pilotes de concreto, lo que no implicaría costos adicionales en equipo. (Londoño, 2015)

1.4 HIPÓTESIS

El uso del acero como material para la cimentación del caso de estudio seleccionado (Bodega Forjas Bolívar) puede llegar a ser más eficiente a nivel de costos y comportamiento con respecto al sistema de cimentación con pilotes hincados prefabricados de concreto, usado originalmente en este proyecto.

2. METODOLOGÍA

ETAPA I. Establecimiento de los parámetros de diseño y construcción

En esta etapa se seleccionaran los parámetros a utilizar para el diseño y la construcción. Se realizará una revisión de la bibliografía disponible y una revisión de los métodos de cálculo (está considerado el estudio de suelos original y los diseños originales), Los parámetros incluyen:

- Existencia de edificaciones e infraestructura vecina.
- Tipo de edificación.
- Sistema estructural.
- Cargas.
- Humedad del terreno.
- Clasificación de los estratos del suelo.
- Resultados de los ensayos de laboratorio de las muestras del suelo.
- Profundidad del nivel freático.
- Recomendaciones del geotecnista acerca del diseño.
- Recomendaciones de construcción.
- Costos de materiales.

ETAPA II. Diseño de las cimentaciones para el caso de estudio usando pilotes de concreto y pilotes metálicos

Haciendo uso de los parámetros establecidos en la ETAPA I, se determinará la profundidad, las dimensiones de los pilotes, la cantidad de pilotes necesarios, la ubicación de los pilotes en el terreno, la capacidad estructural de los pilotes y la capacidad de carga geotécnica.

ETAPA III. Análisis comparativo

Tanto para el sistema de pilotes de concreto como para el sistema de pilotes metálicos, se debe realizar:

1. Cantidades de obra: de acuerdo con el diseño y los parámetros establecidos en la ETAPA II, se deben calcular las cantidades de material.
2. Estimación de Precios: se determinará el costo aproximado de los materiales y se calculará el costo total de la cimentación, esto con el fin de comparar los precios entre el uso de un material u otro.
3. Consideraciones especiales: en estas consideraciones, se deberá tener en cuenta factores como las ventajas del sistema.

3. DESARROJO DEL PROYECTO

3.1 Ejemplos ilustrativos

Para realizar una mejor comprensión entre las diferencias de la capacidad de carga de los materiales se realizan dos ejemplos ilustrativos:

- El primer ejemplo son dos pilotes (uno de concreto y otro metálico) que tienen la misma longitud y el mismo perímetro y se encuentran enterrados en un suelo granular ($C_u = 0$). Las características del suelo se muestran en la Ilustración 16. Ejemplo de capacidad de carga en suelo granular. Fuente: Elaboración propia (la parte sombreada representa el pilote):

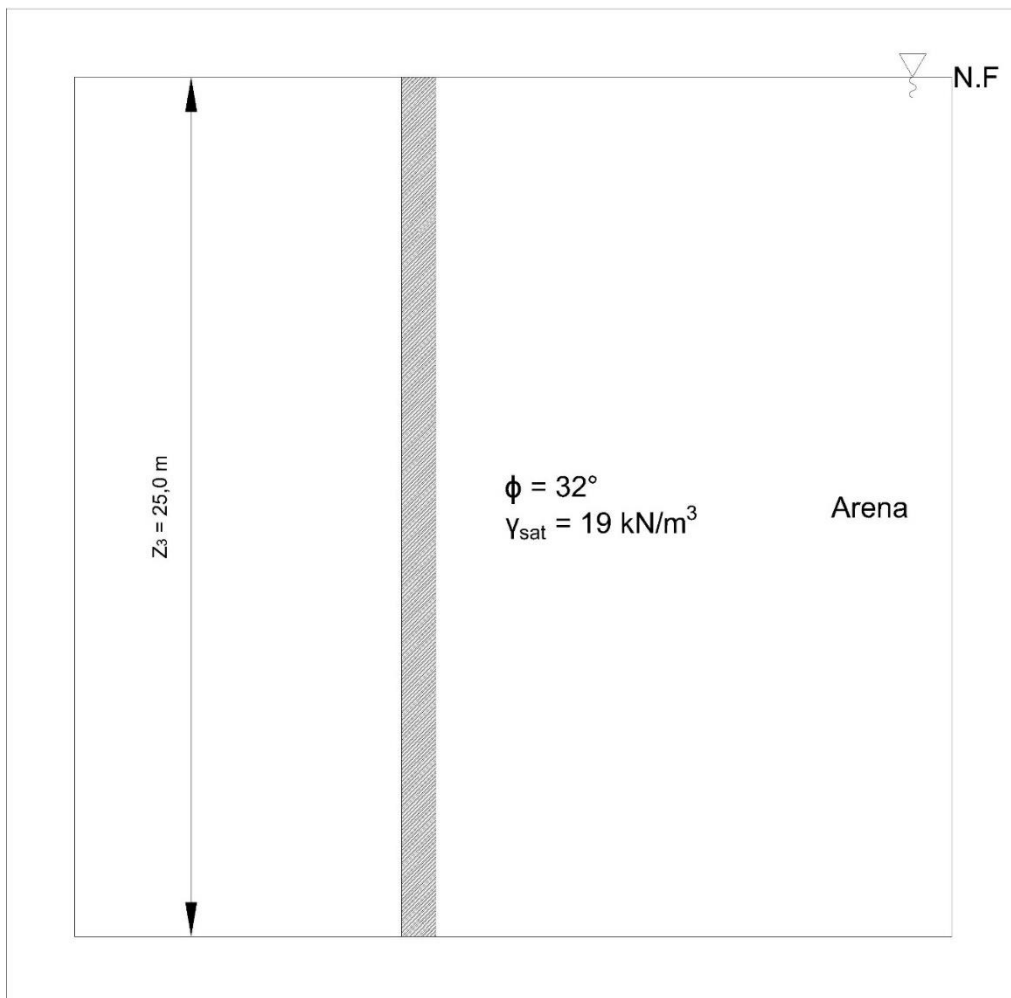


Ilustración 16. Ejemplo de capacidad de carga en suelo granular. Fuente: Elaboración propia

Las características geométricas de los pilotes son las siguientes:

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

Pilote de concreto:

- Longitud del pilote = $L_p = 25 \text{ m}$
- Diametro del pilote = $D_p = 0,28 \text{ m}$
- Perimetro del pilote = $P_e = \pi \cdot D_p = 0,88 \text{ m}$
- Area de sección transversal = $A_p = \frac{\pi \cdot D_p^2}{4} = 0,06158 \text{ m}^2$
- Peso especifico del material = $\gamma_c = 23,544 \text{ kN/m}^3$
- Volumen del pilote = $V_p = A_p \cdot L_p = 1,5395 \text{ m}^3$
- Peso propio del pilote = $W = V_p \cdot \gamma_c = 33,25 \text{ kN}$

Pilote metálico:

- Perfil W 150 X 22,5 mm $\times \text{kgf/m}$
- Longitud del pilote = $L_p = 25 \text{ m}$
- Perimetro del pilote = $P_e = \pi \cdot D_p = 0,88 \text{ m}$
- Area de sección transversal = $A_p = 0,02310 \text{ m}^2$
- Peso por metro = $\gamma_m = 0,220725 \text{ kN/m}$
- Peso propio del pilote = $W = L_p \cdot \gamma_m = 5,52 \text{ kN}$

Cálculo de la capacidad por fricción (Q_s):

El valor Q_s Se calcula como:

$$Q_s = P_e \cdot L_p \cdot f$$

$$f = K \cdot \overline{\sigma'_0} \cdot \tan \delta'$$

$$1 - \sin \phi \leq K \leq 1,4(1 - \sin \phi)$$

$$\overline{\sigma'_0} = \frac{L_p}{2} \cdot \gamma'$$

$$\gamma' = \gamma_{sat} - 9,81 \text{ kN/m}^3$$

Tabla 1. Ecuaciones para calcular el valor de δ' según el material. Fuente: (Gerda Corsa, 2015)

Material	Concreto	Acero
δ'	$0,9 \cdot \phi \leq \delta' \leq \phi$	$0,67 \cdot \phi \leq \delta' \leq 0,8 \cdot \phi$

Para los valores de K y δ' se toma un valor promedio entre el máximo y el mínimo.

Cálculo de la capacidad por punta (Q_p):

El valor Q_p se calcula como:

$$Q_p = A_p \cdot q' \cdot N_q^* \leq A_p (0,5 \cdot P_a \cdot N_q^* \cdot \tan \phi)$$

$$q' = \gamma' \cdot L_p$$

El valor N_q^* se toma de la Tabla 2. Valores interpolados de N_q^* con base en la teoría de Meyerhof. Fuente: (Das, 2005)

Tabla 2. Valores interpolados de N_q^* con base en la teoría de Meyerhof. Fuente: (Das, 2005)

Ángulo de fricción del suelo, ϕ (grados)	N_q^*
20	12.4
21	13.8
22	15.5
23	17.9
24	21.4
25	26.0
26	29.5
27	34.0
28	39.7
29	46.5
30	56.7
31	68.2
32	81.0
33	96.0
34	115.0
35	143.0
36	168.0
37	194.0
38	231.0
39	276.0
40	346.0
41	420.0
42	525.0
43	650.0
44	780.0
45	930.0

$$P_a \approx 100 \text{ kN/m}^2$$

Tabla 3. Resultados de los cálculos de capacidad de carga de los pilotes

Material	Concreto	Acero
δ'	30,4°	23,5°
$\overline{\sigma'_0}$	114,875 kN/m^2	114,875 kN/m^2
K	0,56	0,56
f	37,74 kN/m^2	27,97 kN/m^2
Q_s	830,28 kN	615,34 kN
N_q^*	81,0	81,0
q'	229,75 kN/m^2	229,75 kN/m^2
Q_p	1145,99 kN < 155,84 kN	429,88 kN < 58,46 kN
Peso propio (W)	33,25 kN	5,52 kN
Q_{neto}	952,87 kN	668,28 kN

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

- El segundo ejemplo es igual al primero pero cambian las condiciones del suelo. En este se evalúa la capacidad de carga de los pilotes en un suelo cohesivo ($\phi = 0^\circ$). Las características del suelo se muestran en la Ilustración 17. Ejemplo de capacidad de carga en suelo cohesivo. Fuente: Elaboración propia.

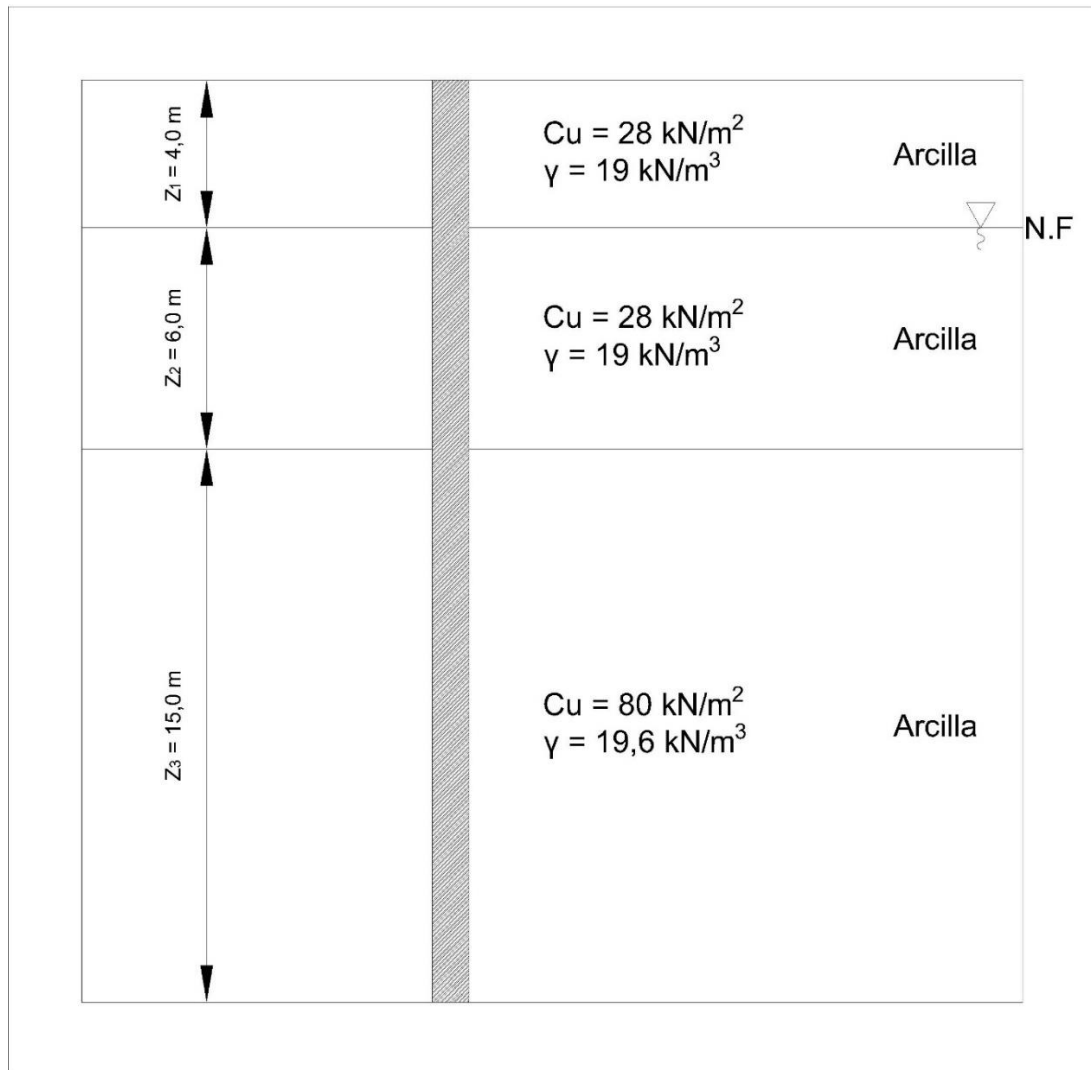


Ilustración 17. Ejemplo de capacidad de carga en suelo cohesivo. Fuente: Elaboración propia

Las características de geométricas de los pilotes son las mismas que en el ejemplo anterior.

Perfil de esfuerzos efectivos:

- Estrato 1: $\sigma'_{01} = \gamma_1 \cdot Z_1 = 76,0 \text{ kN/m}^2$
- Estrato 2: $\sigma'_{02} = \sigma_{01} + (\gamma_2 - 9,81 \text{ kN/m}^3) \cdot Z_2 = 131,14 \text{ kN/m}^2$
- Estrato 3: $\sigma'_{03} = \sigma_{02} + (\gamma_3 - 9,81 \text{ kN/m}^3) \cdot Z_3 = 277,99 \text{ kN/m}^2$

Cálculo de la capacidad por fricción (Q_s):

El valor Q_s Se calcula como:

$$Q_s = P_e \cdot L_p \cdot f$$

$$f = \lambda(\overline{\sigma'_0} + 2C_u)$$

El valor de λ se toma de la

Tabla 4. Variación de λ con la longitud de empotramiento

Tabla 4. Variación de λ con la longitud de empotramiento. Fuente: (Das, 2005)

Longitud de empotramiento, L (m)	λ
0	0.5
5	0.336
10	0.245
15	0.200
20	0.173
25	0.150
30	0.136
35	0.132
40	0.127
50	0.118
60	0.113
70	0.110
80	0.110
90	0.110

$$\overline{\sigma'_0} = \frac{\overline{\sigma'_{01}} \cdot Z_1 + \overline{\sigma'_{02}} \cdot Z_2 + \overline{\sigma'_{03}} \cdot Z_3}{L_p}$$

$$\overline{\sigma'_{01}} = \frac{\sigma'_{01}}{2}$$

$$\overline{\sigma'_{02}} = \frac{\sigma'_{01} + \sigma'_{02}}{2}$$

$$\overline{\sigma'_{03}} = \frac{\sigma'_{02} + \sigma'_{03}}{2}$$

$$C_u = \frac{C_{u1} \cdot Z_1 + C_{u2} \cdot Z_2 + C_{u3} \cdot Z_3}{L_p}$$

Cálculo de la capacidad por punta (Q_p):

El valor Q_p se calcula como:

$$Q_p = A_p \cdot N_c^* \cdot C_u$$

En libro Fundamentos de Ingeniería de Cimentaciones de Braja Das (2005) se sugiere un valor de $N_c^* = 9$ para arcillas.

Para el valor de C_u (Cohesión no drenada) se debe tomar el correspondiente al estrato donde se encuentra la punta del pilote.

Tabla 5. Resultados de los cálculos de capacidad de carga de los pilotes

Material	Concreto	Acero
λ	0,150	0,150
$\overline{\sigma'_{01}}$	38,0 kN/m^2	38,0 kN/m^2
$\overline{\sigma'_{02}}$	103,57 kN/m^2	103,57 kN/m^2
$\overline{\sigma'_{03}}$	204,57 kN/m^2	204,57 kN/m^2
$\overline{\sigma'_0}$	153,68 kN/m^2	153,68 kN/m^2
C_u	59,2 kN/m^2	59,2 kN/m^2
f	40,81 kN/m^2	40,81 kN/m^2
Q_s	897,82 kN	897,82 kN

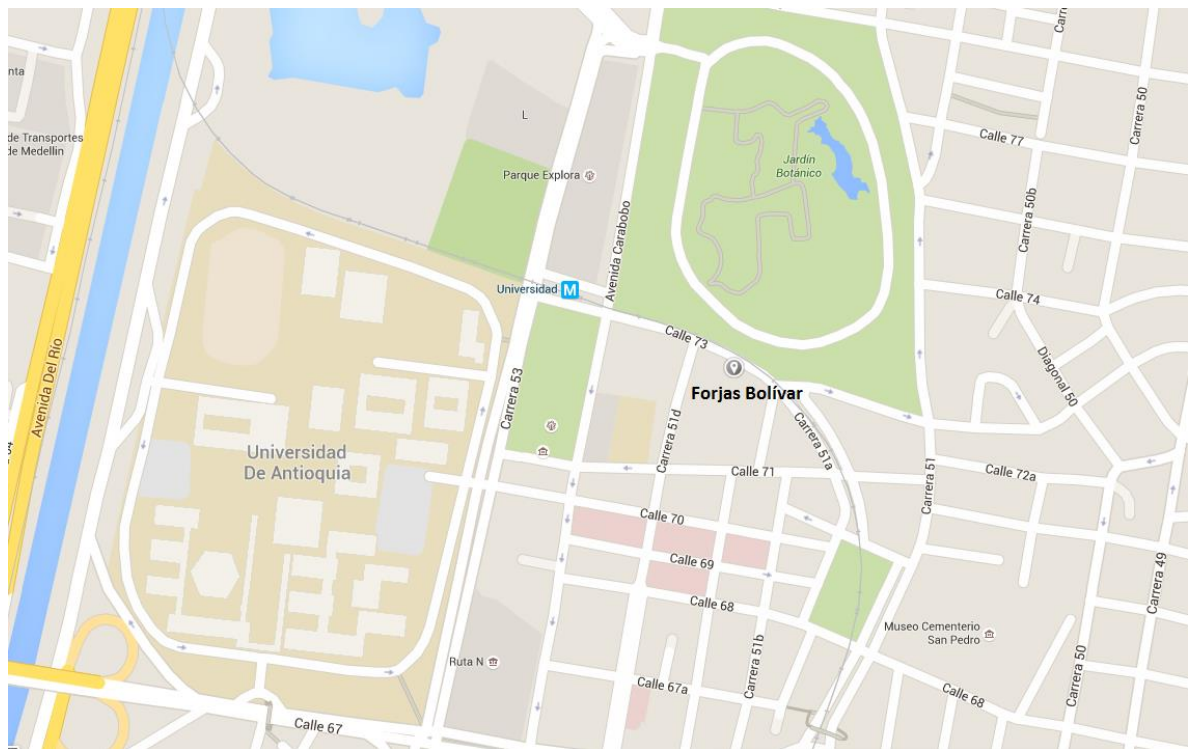
N_c^*	9,0	9,0
C_u	80,0 kN/m^2	80,0 kN/m^2
Q_p	44,34 kN	16,63 kN
Peso propio (W)	33,25 kN	5,52 kN
Q_{neto}	908,91 kN	908,93 kN

3.2 ETAPA I. Establecimiento de los parámetros de diseño y construcción.

3.2.1 Caso de estudio

El caso de estudio es una bodega con un área aproximada de $580 m^2$ y una altura aproximada de $7,8 m$, perteneciente a Forjas Bolívar S.A.S. Esta es una empresa metalmecánica especializada en la fabricación y diseño de equipos para manejo de materiales a granel, sistemas de sujeción y fabricaciones especiales para industria cementera, Minera, de Petróleos, de infraestructura y de alimentos. (“Forjas Bolívar,” n.d.).

Se encuentra ubicada en la calle 73 No. 51C – 35, sector perteneciente al municipio de Medellín. En la Ilustración 18. Ubicación de la bodega. Fuente: Google Maps se muestra la localización aproximada del lugar.



La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

La geometría de la bodega se muestra en la Ilustración 19. Vista en planta del diseño estructural de la bodega e Ilustración 20. Vista lateral del diseño estructural de la bodega.

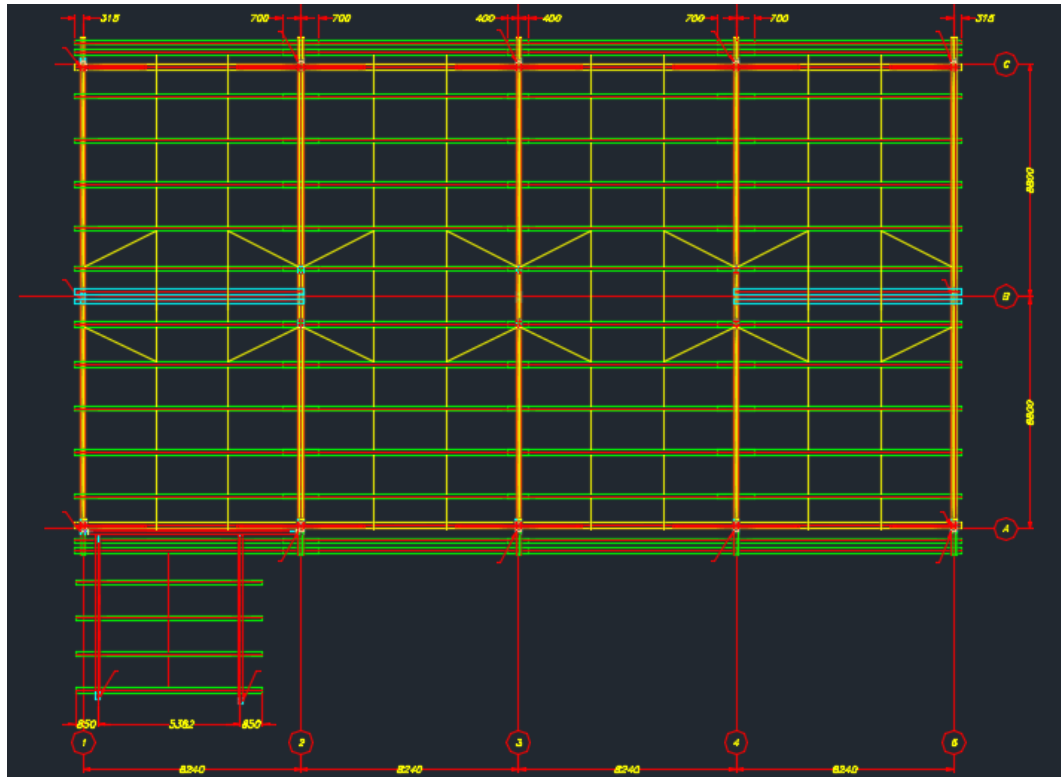


Ilustración 19. Vista en planta del diseño estructural de la bodega. Fuente: Planos de la bodega

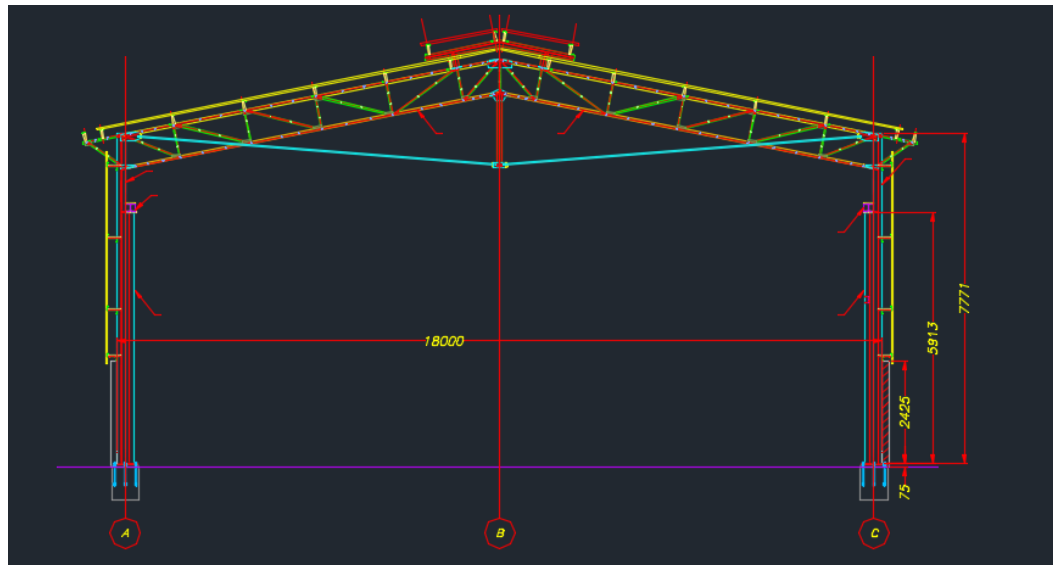


Ilustración 20. Vista lateral del diseño estructural de la bodega. Fuente: Planos de la bodega.

La bodega presenta un Puente-Grúa (Ilustración 21. Imagen del Puente- Grúa), el cual es usado para levantar cargas pesadas y transportarlas a través de toda el área del lugar. Este

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

tiene libertad de desplazamiento horizontal y para el cálculo de las reacciones se deben tener en cuenta todas las consideraciones de ubicación y carga necesarias para cubrir los casos más críticos para el posterior diseño de las fundaciones.

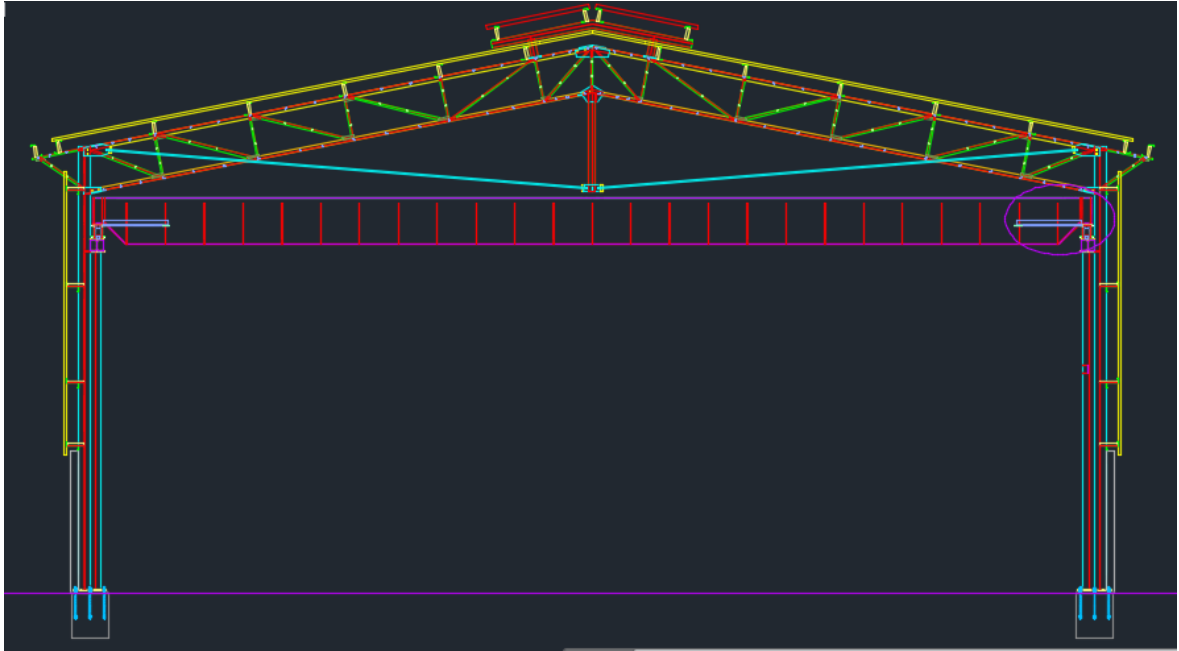


Ilustración 21. Imagen del Puente- Grúa. Fuente: Planos de la bodega

3.2.2 Consideraciones estructurales

- **Sistema estructural**

La estructura está compuesta por cinco pórticos en acero equidistantes en una dirección y un sistema de cubierta a dos aguas. Los pórticos están compuestos por vigas en celosía.

- **Existencia de edificaciones e infraestructura vecina.**

La estructura limita con:

NORTE:	Fábrica
SUR:	Depósito
ORIENTE:	Bodega
COCCIDENTE	Lote

- **Cargas.**

El detalle de las cargas se mostrará en la sección de diseño de este trabajo. Se cuenta con el modelo estructural original de la bodega, proporcionado por el ingeniero calculista Luis Horacio Restrepo. En este modelo ya se consideran todos los casos de carga incluyendo las posiciones del Puente-Grúa que son más críticas para el diseño.

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

3.2.3 Consideraciones del suelo

El estudio de suelos original se presentará como anexo a este trabajo de grado, sin embargo se realizará un resumen de su contenido.

El día 20 de enero del 2006 se realizó el trabajo de campo en el cual se realizaron cuatro perforaciones mecánicas, tres de las perforaciones mediante el SPT y la otra mediante el ensayo de penetración con cono (CPT). La localización aproximada de los sondeos se muestra en la Ilustración 22. Localización aproximada de los sondeos.. Se tomaron muestras a las cuales se les realizaron los siguientes ensayos de laboratorio:

- Contenido de humedad natural
- Límite líquido
- Límite plástico
- Ensayo de compresión simple

Tabla 6. Profundidad de sondeos y presencia de agua

SONDEO No.	TIPO DE ENSAYO	PROFUNDIDAD (m)	PRESENCIA DE AGUA (m)
1	SPT	9,00	2,10
2	SPT	8,70	2,00
3	CPT	7,35	1,70
4	SPT	7,70	1,60

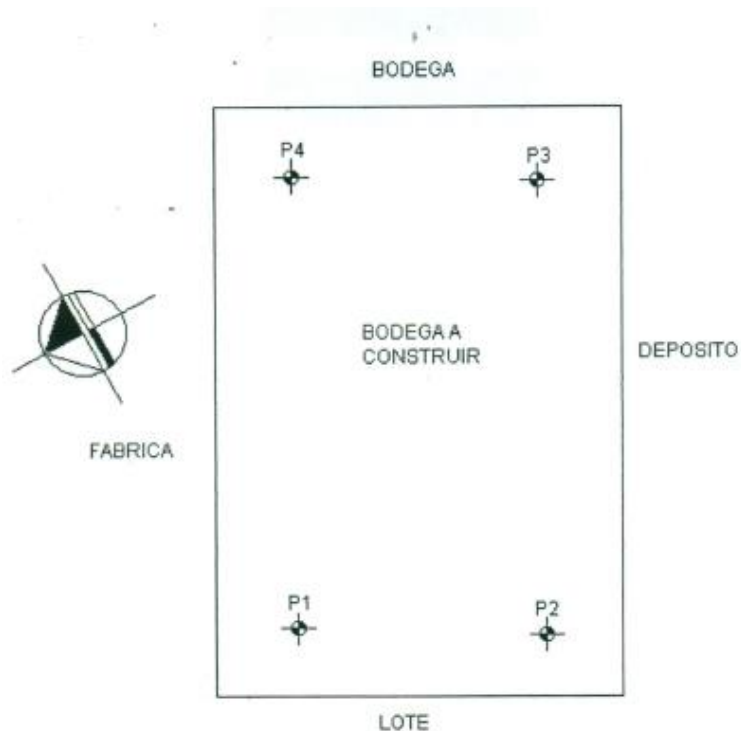


Ilustración 22. Localización aproximada de los sondeos.

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

De acuerdo con el estudio realizado, el suelo presenta las siguientes características:

- Nivel freático a profundidades variables entre 1,60 y 2,10 metros.
- Se presentan dos estratos de suelo diferentes, la más superficial (hasta profundidades entre 3,60 y 5,10 metros) se compone de un lleno mal conformado, el cual posee deficientes propiedades físico mecánicas, el otro estrato es un suelo fino granular, correspondiente a un limo el cual tiene bajas propiedades mecánicas hasta aproximadamente los 7,10 metros de profundidad. Dado que el porcentaje de finos obtenido en la caracterización es alto, se puede considerar que el suelo se comporta como una acilla (cohesivo).
- En la Ilustración 23. Perfil estratigráfico. Fuente: Estudio de suelos se muestra los valores obtenidos de las perforaciones donde se realizó el ensayo de penetración estándar (SPT).
- La profundidad de desplante de los dados será de 1,5 m.

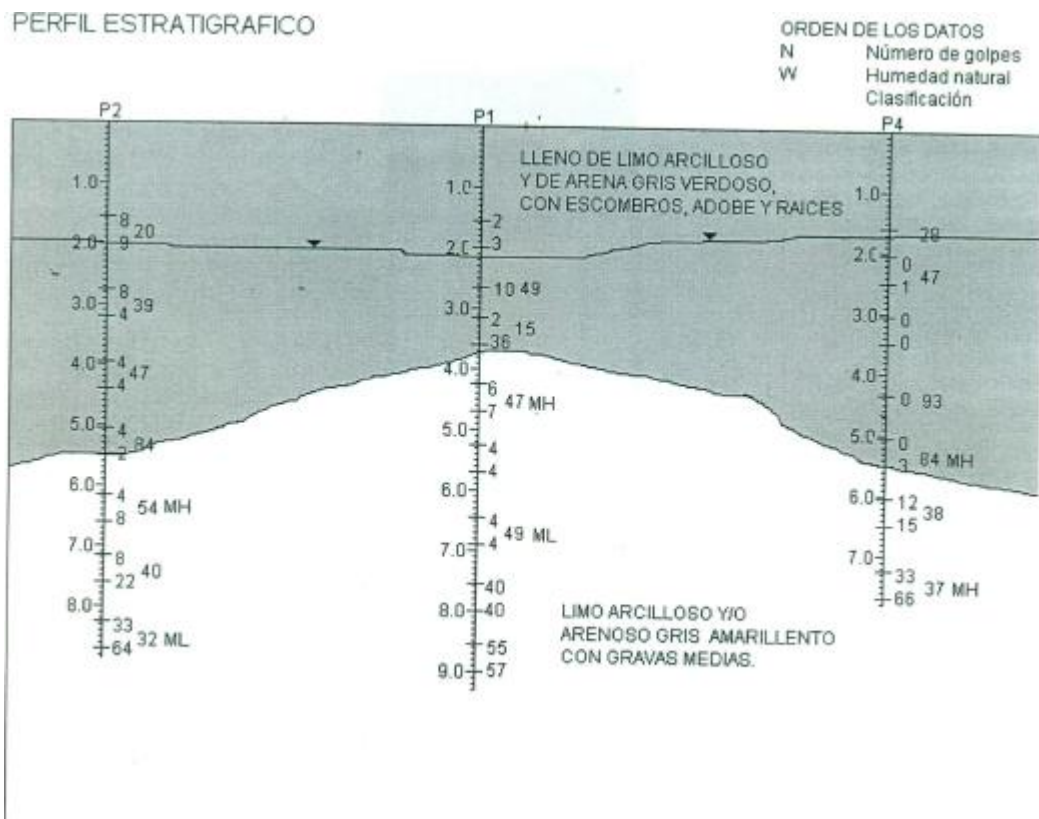


Ilustración 23. Perfil estratigráfico. Fuente: Estudio de suelos

En este caso de estudio se puede aplicar una de las principales ventajas que tienen los pilotes metálicos, que es la capacidad de atravesar con mayor facilidad estratos duros de suelo garantizando la integridad del material. Por el contrario, los pilotes de concreto se ven

limitados en este aspecto ya que cuando se encuentran con un suelo de altas propiedades, se corre el riesgo de dañar la integridad del mismo. (Das, 2005)

Por lo anterior se determina que los pilotes de concreto actuarán solo por punta, mientras que los pilotes metálicos actuarán por punta y una pequeña longitud del pilote (lo que se atraviesa del estrato duro) desarrollará una fricción que será tomada en cuenta en los cálculos. El valor de número de golpes donde se apoyarán los pilotes de concreto es de $N = 57$ ubicado aproximadamente a nueve metros de profundidad según la perforación cuatro (P4).

Se realiza una corrección al número de golpes obtenidos en el ensayo SPT con el fin de estandarizar los resultados, ya que cada ensayo tiene condiciones particulares que lo diferencian de los demás, para esto se saca un valor N_{60} el cual es utilizado para realizar correlaciones con los parámetros del suelo. (Das, 2005)

Para obtener el valor N_{60} se utiliza la siguiente formula:

$$N_{60} = \frac{N \cdot \eta_H \cdot \eta_B \cdot \eta_S \cdot \eta_R}{60}$$

Donde

- N_{60} : Número de penetración estándar, corregido por las condiciones en el campo
- N : Número de penetración medido
- η_H : Eficiencia del martinete (%)
- η_B : Corrección por el diámetro de la perforación
- η_S : Corrección del muestreador
- η_R : Corrección por longitud de la barra

Los valores anteriormente mencionados se obtienen de la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..**

Tabla 7. Variación de η_H , η_B , η_S , η_R . Fuente: (Das, 2005)

1. Variación de η_H				2. Variación de η_B	
País	Tipo de martinete	Liberación del martinete	η_H (%)	Diámetro, mm	η_B
Japón	Toroide	Caída libre	78	60-120 150 200	1 1.05 1.15
	Toroide	Cuerda y polea	67		
Estados Unidos	De seguridad	Cuerda y polea	60		
	Toroide	Cuerda y polea	45		
Argentina	Toroide	Cuerda y polea	45		
China	Toroide	Caída libre	60		
	Toroide	Cuerda y polea	50		
3. Variación de η_S				4. Variación de η_R	
Variable		η_S		Longitud de la barra, m	η_R
Muestreador estándar		1.0		> 10	1.0
Con recubrimiento para arena y arcilla densas		0.8		6-10	0.95
Con recubrimiento para arena suelta		0.9		4-6	0.85
				0-4	0.75

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

Dado que no se cuenta con información exacta sobre la realización del ensayo SPT se toman valores conservadores de los factores de corrección. Estos se muestran en la Tabla 8. Valores de factores de corrección para el numero de penetración.

Tabla 8. Valores de factores de corrección para el numero de penetración

FACTOR DE CORRECCIÓN	VALOR
η_H	50,0%
η_B	1,0
η_S	1,0
η_R	0,85

Por lo tanto:

Para $N = 57 \rightarrow N_{60} = 40$

Con el valor N_{60} determinado se procede a calcular el valor de cohesión no drenada (C_u) mediante la siguiente correlación que sugieren Hara y colaboradores (1971):

$$\frac{C_u}{P_a} = 0,29 \cdot N_{60}^{0,72}$$

Donde $P_a = \text{presión atmosférica} \approx 100 \text{ kN/m}^2$

Por lo tanto para este diseño:

$$N_{60} = 40 \rightarrow C_u = 413 \text{ kN/m}^2$$

3.3 ETAPA II. Diseño de la cimentación para el caso de estudio usando pilotes de concreto y pilotes metálicos

A partir del modelo proporcionado por el ingeniero Luis Horacio Restrepo (ver Ilustración 24. Imagen del modelo de la bodega en STAAD.Pro), se determinaron los valores de fuerzas y momentos más desfavorables para las cimentaciones de la estructura tanto para cargas estáticas (sin sismo), como para cargas dinámicas (con sismo). Las cargas verticales ya consideran el peso propio de la zapata sobre los pilotes y el suelo que se encuentra sobre esta, estimándola como el 10% de la carga que bajan las columnas.

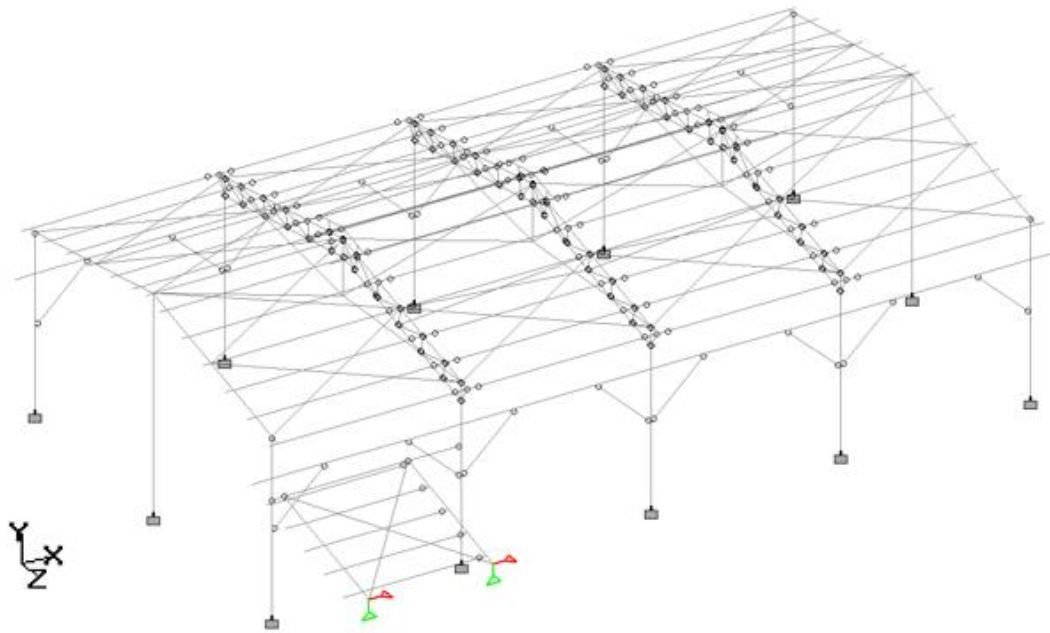


Ilustración 24. Imagen del modelo de la bodega en STAAD.Pro.

- Combinaciones de carga críticas por estado límite de servicio:

- Combinación 1 (D+L):

$$F_Y = 146 \text{ kN}$$

$$M_X = 66 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$M_Z = 5,7 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

- Combinación 2 (D+L+0.7E):

$$F_Y = 128 \text{ kN}$$

$$M_X = 61 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$M_Z = 29 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

- Combinación 3 (D+L+0.7E):

$$F_Y = 145 \text{ kN}$$

$$M_X = 71 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$M_Z = 5,2 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

- Combinaciones de carga críticas mayoradas por resistencia:

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

- Combinación 4 (1.2D+1.6L):

$$F_Y = 219 \text{ kN}$$

$$M_X = 99 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$M_Z = 8,5 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

- Combinación 5 (1.2D+1.0L+1.0E):

$$F_Y = 192 \text{ kN}$$

$$M_X = 92 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$M_Z = 44 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

- Combinación 6 (1.2D+1.0L+1.0E):

$$F_Y = 218 \text{ kN}$$

$$M_X = 107 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$M_Z = 7,8 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

3.3.1 Pilotes de concreto.

El suelo presenta las características mostradas en la Ilustración 25. Parámetros del suelo y profundidad de los pilotes de concreto. Fuente: Elaboración propia:

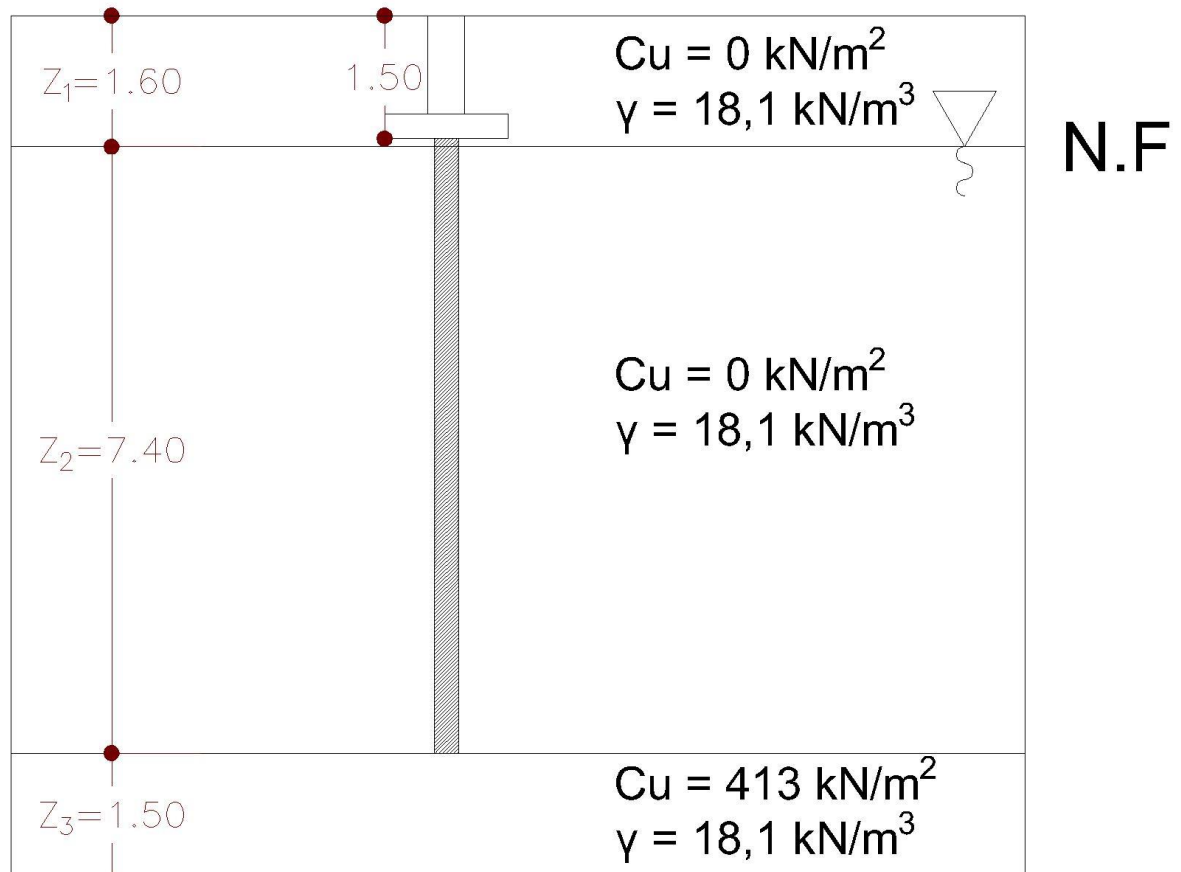


Ilustración 25. Parámetros del suelo y profundidad de los pilotes de concreto. Fuente: Elaboración propia

Se asume una $C_u = 0$ en los estratos superiores, de acuerdo con la sección 1.3.2 (Pilotes por punta), ya que solo nos interesa el valor del estrato donde apoyaremos el pilote (aplica también para el diseño con pilotes metálicos).

La capacidad geotécnica del pilote de 30 cm de diámetro se obtiene como:

$$Q_p = \frac{N_c^* \cdot C_u \cdot A_p}{F.S}$$

$N_c^* = 9,0$ para arcillas

Tomamos un factor de seguridad $F.S = 3,0$

$$A_p = \frac{\pi \cdot D_p^2}{4} = 0,070686 \text{ m}^2$$

$$Q_p = \frac{9 \cdot 413 \text{ kN/m}^2 \cdot 0,070686 \text{ m}^2}{3,0}$$

$$Q_p = Q_{neta} = 87 \text{ kN}$$

Es usual permitir un incremento de la capacidad del pilote de hasta el 50% cuando se somete a cargas dinámicas, debido al incremento de las propiedades mecánicas al aumentar la velocidad de aplicación de la carga.

$$Q_{neta\text{din}} = 130 \text{ kN}$$

Para cumplir con las solicitaciones requeridas se realiza un predimensionamiento con cuatro pilotes separados entre ejes tres veces el diámetro, como se recomienda normalmente (Ver Ilustración 26. Predimensionamiento del dado con cuatro pilotes. Fuente: Elaboración propia).

$$s = 3 \cdot D_p = 90 \text{ cm}$$

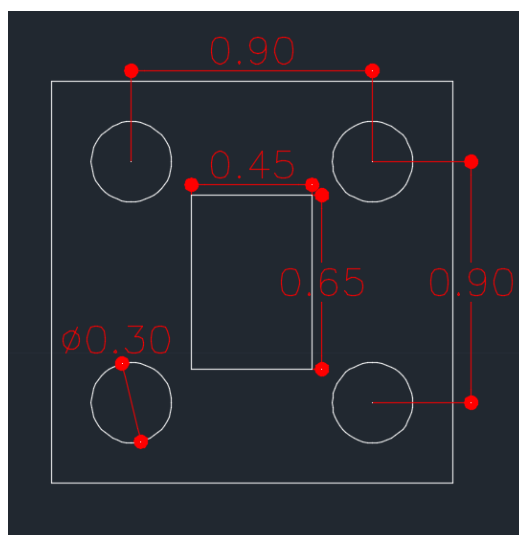


Ilustración 26. Predimensionamiento del dado con cuatro pilotes. Fuente: Elaboración propia

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

Se procede a calcular las cargas máximas a las que va a estar sometido el pilote más cargado, las cuales no pueden superar la Q_{neta} .

$$P_{max} = \frac{F_Y}{4} + \frac{M_X}{0,9\text{ m} \times 2} + \frac{M_Z}{0,9\text{ m} \times 2}$$

Combinación 1:

$$P_{max} = \frac{146\text{ kN}}{4} + \frac{66\text{ kN} \cdot \text{m}}{0,9\text{ m} \times 2} + \frac{5,7\text{ kN} \cdot \text{m}}{0,9\text{ m} \times 2} = 76\text{ kN} < 87\text{ kN}$$

Combinación 2:

$$P_{max} = \frac{128\text{ kN}}{4} + \frac{61\text{ kN} \cdot \text{m}}{0,9\text{ m} \times 2} + \frac{29\text{ kN} \cdot \text{m}}{0,9\text{ m} \times 2} = 82\text{ kN} < 130\text{ kN}$$

Combinación 3:

$$P_{max} = \frac{145\text{ kN}}{4} + \frac{71\text{ kN} \cdot \text{m}}{0,9\text{ m} \times 2} + \frac{5,2\text{ kN} \cdot \text{m}}{0,9\text{ m} \times 2} = 79\text{ kN} < 130\text{ kN}$$

Por lo tanto la distribución de pilotes es aceptable y se procede a realizar el diseño del dado.

Para este se supone la dimensión mínima recomendada de $d = 0,3\text{ m}$ ($d = \text{altura efectiva del dado}$).

- Chequeo de cortante bidireccional (punzonamiento)

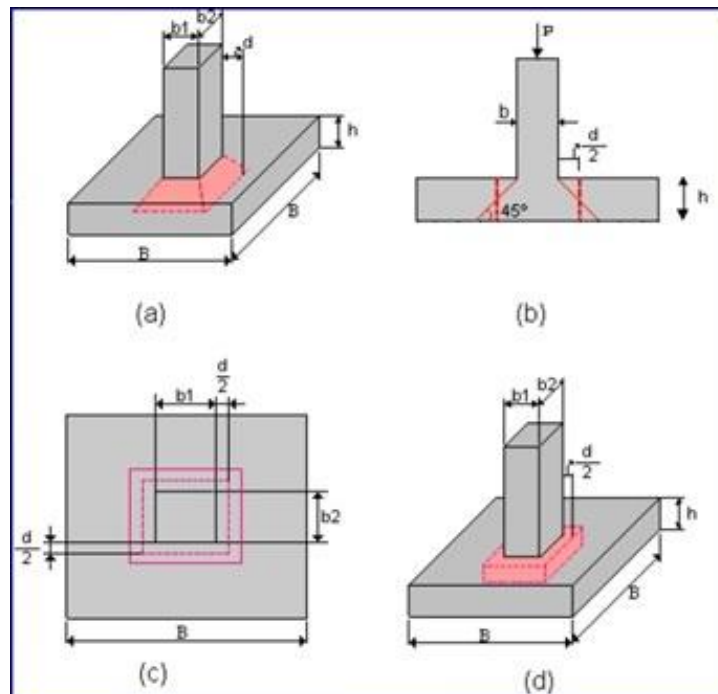


Ilustración 27. Chequeo de cortante bidireccional. Fuente: (Garza Vásquez, 2000)

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

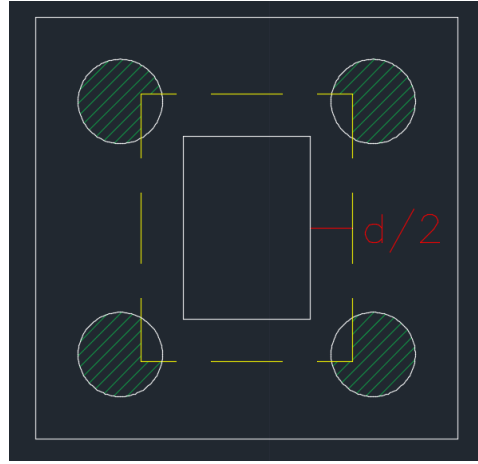


Ilustración 28. Área que aporta a la fuerza cortante. Fuente: Elaboración propia

El cortante aplicado al dado para la combinación de cargas mayoradas más desfavorable es:

$$V_{bd} = 219 \text{ kN} - \frac{219 \text{ kN}}{4} \times 12,5\% \times 4 = 192 \text{ kN} = 192000 \text{ N}$$

Donde 12,5% corresponde a la proporción de pilote que queda dentro de la superficie de falla.

$$b_0 = 3200 \text{ mm}$$

$$d = 300 \text{ mm}$$

$$v_{bd} = \frac{V_{bd}}{b_0 \cdot d} = \frac{192000 \text{ N}}{3200 \text{ mm} \cdot 300 \text{ mm}} = 0,2 \text{ MPa}$$

Se debe cumplir que:

$$v_{bd} < \begin{cases} \phi_v \cdot 0,17 \cdot \left(1 + \frac{2}{\beta}\right) \cdot \lambda \cdot \sqrt{f'c} \\ \phi_v \cdot 0,083 \cdot \left(\frac{\alpha_s \cdot d}{b_0} + 2\right) \cdot \lambda \cdot \sqrt{f'c} \\ \phi_v \cdot 0,33 \cdot \lambda \cdot \sqrt{f'c} \end{cases}$$

Donde:

$$\phi_v = 0,75$$

$$\beta = b_1/b_2 = 0,65/0,45 = 1,44$$

$$\lambda = 1,0$$

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

$$f'c = 21 \text{ MPa}$$

$$\alpha_s = 40$$

$$0,2 \text{ MPa} < \begin{cases} 1,39 \text{ MPa} \\ 1,64 \text{ MPa} \\ 1,13 \text{ MPa} \end{cases} \quad \text{Cumple}$$

- Chequeo de cortante local (punzonamiento del pilote)

Se aplica el mismo procedimiento del chequeo anterior para el pilote más cargado.

En la Ilustración 29. Punzonamiento local. Fuente: Elaboración propia se muestra la zona donde se realiza el chequeo del punzonamiento local.

Combinación 4:

$$P_{max} = \frac{219 \text{ kN}}{4} + \frac{99 \text{ kN} \cdot \text{m}}{0,9 \text{ m} \times 2} + \frac{8,5 \text{ kN} \cdot \text{m}}{0,9 \text{ m} \times 2} = 114 \text{ kN}$$

Combinación 5:

$$P_{max} = \frac{192 \text{ kN}}{4} + \frac{92 \text{ kN} \cdot \text{m}}{0,9 \text{ m} \times 2} + \frac{44 \text{ kN} \cdot \text{m}}{0,9 \text{ m} \times 2} = 124 \text{ kN}$$

Combinación 6:

$$P_{max} = \frac{218 \text{ kN}}{4} + \frac{107 \text{ kN} \cdot \text{m}}{0,9 \text{ m} \times 2} + \frac{7,8 \text{ kN} \cdot \text{m}}{0,9 \text{ m} \times 2} = 118 \text{ kN}$$

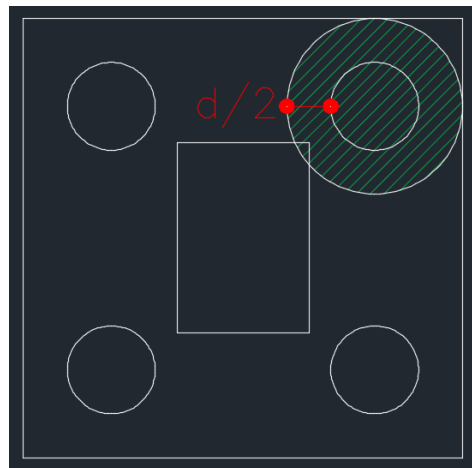


Ilustración 29. Punzonamiento local. Fuente: Elaboración propia

$$V_{bd} = 124 \text{ kN} = 124000 \text{ N}$$

$$b_0 = 1885 \text{ mm}$$

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

$$d = 300 \text{ mm}$$

$$v_{bd} = \frac{V_{bd}}{b_0 \cdot d} = \frac{124000 \text{ N}}{1885 \text{ mm} \cdot 300 \text{ mm}} = 0,22 \text{ MPa}$$

Se debe cumplir que:

$$v_{bd} < \begin{cases} \phi_v \cdot 0,17 \cdot \left(1 + \frac{2}{\beta}\right) \cdot \lambda \cdot \sqrt{f'c} \\ \phi_v \cdot 0,083 \cdot \left(\frac{\alpha_s \cdot d}{b_0} + 2\right) \cdot \lambda \cdot \sqrt{f'c} \\ \phi_v \cdot 0,33 \cdot \lambda \cdot \sqrt{f'c} \end{cases}$$

Donde:

$$\phi_v = 0,75$$

$$\beta = 1,0$$

$$\lambda = 1,0$$

$$f'c = 21 \text{ MPa}$$

$$\alpha_s = 40$$

$$0,22 \text{ MPa} < \begin{cases} 1,75 \text{ MPa} \\ 2,39 \text{ MPa} \\ 1,13 \text{ MPa} \end{cases} \quad \text{Cumple}$$

- Cortante unidireccional (acción de viga)

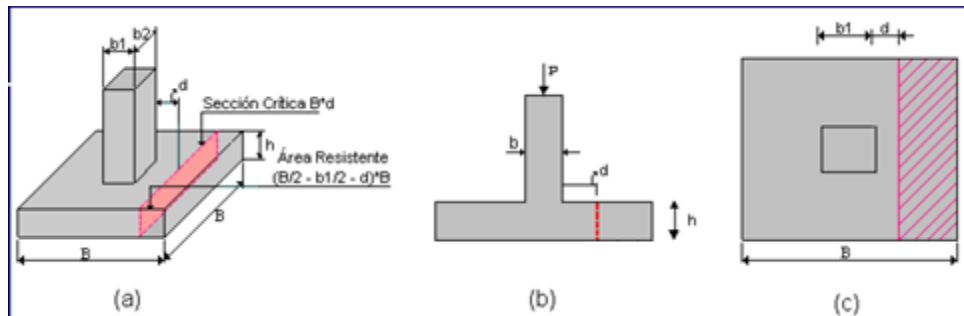


Ilustración 30. Revisión cortante unidireccional. Fuente: (Garza Vásquez, 2000)

En la Ilustración 31. Zona donde se genera el cortante unidireccional. Fuente: Elaboración propia se muestran las zonas donde se debe revisar el cortante unidireccional. Se evidencia que solo en la dirección X se presentan fuerzas cortantes debido a los pilotes.

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

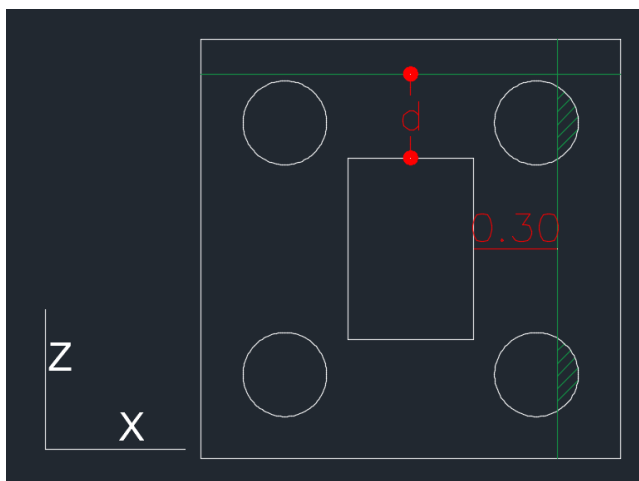


Ilustración 31. Zona donde se genera el cortante unidireccional. Fuente: Elaboración propia

Para cada combinación de cargas, cada pilote va a tener una fuerza aplicada de acuerdo a los momentos aplicados en el dado. Por medio de herramientas de cálculo (Excel) se determinaron las cargas P_1 y P_2 como las más críticas. Los porcentajes son la proporción aproximada del área que aporta al cortante unidireccional.

Para la combinación 5:

$$P_1 = \frac{192 \text{ kN}}{4} + \frac{92 \text{ kN} \cdot \text{m}}{0,9 \text{ m} \times 2} + \frac{44 \text{ kN} \cdot \text{m}}{0,9 \text{ m} \times 2} = 124 \text{ kN}$$

$$P_2 = \frac{192 \text{ kN}}{4} - \frac{92 \text{ kN} \cdot \text{m}}{0,9 \text{ m} \times 2} + \frac{44 \text{ kN} \cdot \text{m}}{0,9 \text{ m} \times 2} = 22 \text{ kN}$$

La longitud total de los dados es $B = 1.5 \text{ m} = 1500 \text{ mm}$

$$V_u = V_1 + V_2$$

$$V_1 = P_1 \times 20\% = 124 \text{ kN} \times 20\% = 25 \text{ kN}$$

$$V_2 = P_2 \times 20\% = 22 \text{ kN} \times 20\% = 5 \text{ kN}$$

$$V_u = 30 \text{ kN} = 30000 \text{ N}$$

$$v_u = \frac{V_u}{B \cdot d} = \frac{30000 \text{ N}}{1500 \text{ mm} \cdot 300 \text{ mm}} = 0,067 \text{ MPa}$$

Este valor debe ser inferior a:

$$v_u < \phi_v \cdot 0,17 \cdot \sqrt{f'c}$$

$$0,067 \text{ MPa} < 0,584 \text{ MPa} \quad \text{Cumple}$$

- Momento y acero a flexión

El momento se calcula como:

$$M_u = V_u \cdot l$$

Donde l es la distancia desde el borde del pedestal hasta la línea ente ejes de pilotes (ver Ilustración 32. Zona donde se desarrolla en momento máximo. Fuente: Elaboración propia).

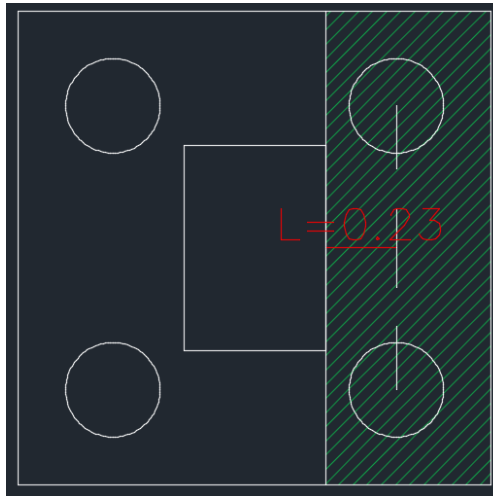


Ilustración 32. Zona donde se desarrolla en momento máximo. Fuente: Elaboración propia

$$V_u = 145 \text{ kN}$$

$$l = 0,23 \text{ m}$$

$$M_u = 33,4 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

Si pongo el acero por temperatura, es decir una cuantía de $\rho_{min} = 0,0018$ El momento resistente es igual a:

$$\phi M_n = 90 \text{ kN} \cdot \text{m} > 33,4 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

Por lo tanto el área de acero requerida en la cara superior e inferior en ambas direcciones será de:

$$A_s = 810 \text{ mm}^2$$

El refuerzo se compone de 7 estribos N°4 en ambas direcciones de tal manera que se forme un cajón de acero, para evitar problemas de contracción (ver Ilustración 33. Distribución del refuerzo del dado. Fuente: Elaboración propia).

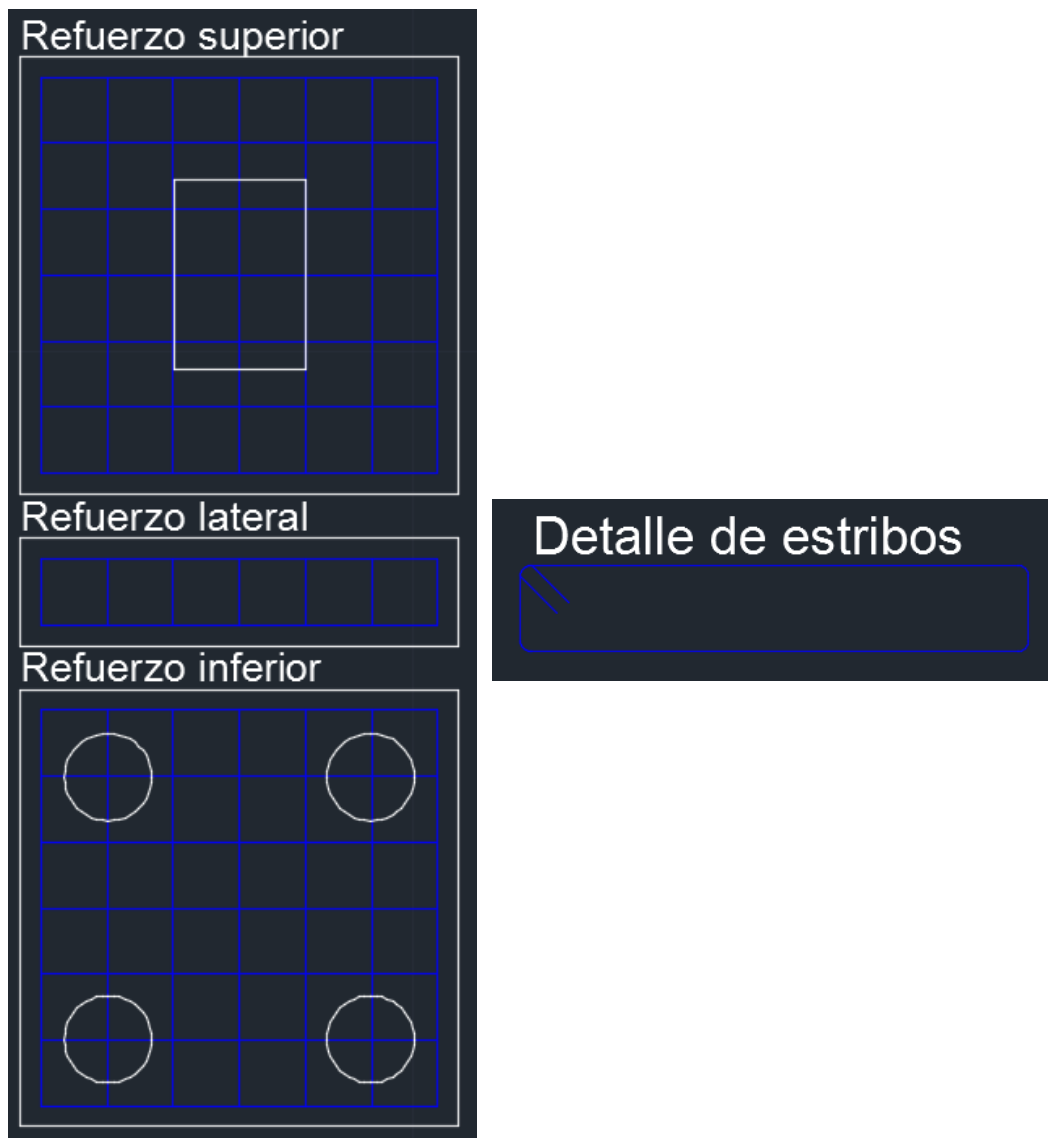


Ilustración 33. Distribución del refuerzo del dado. Fuente: Elaboración propia

La longitud aproximada de cada estribo es de 3,5 m y se necesitan en total 14 estribos por cada dado.

Los pilotes tendrán una longitud de 7,5 m. El refuerzo de los pilotes corresponde a la cuantía mínima exigida por la NSR-10, de acuerdo a la tabla C.15.11-1 ($\rho_{min} = 0,005$ para DMO). Se ponen 4 barras N°4 como refuerzo longitudinal. También se dispondrán 47 estribos N°3, 16 en los primeros 1,2 m y 31 en la longitud restante (ver Ilustración 34. Distribución aproximada del refuerzo en los pilotes. Fuente Elaboración propia). (NSR-10)

La longitud del refuerzo longitudinal es aproximadamente igual a la longitud del pilote (7,5 m) y la longitud de cada estribo es de 0,62 m aproximadamente.

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

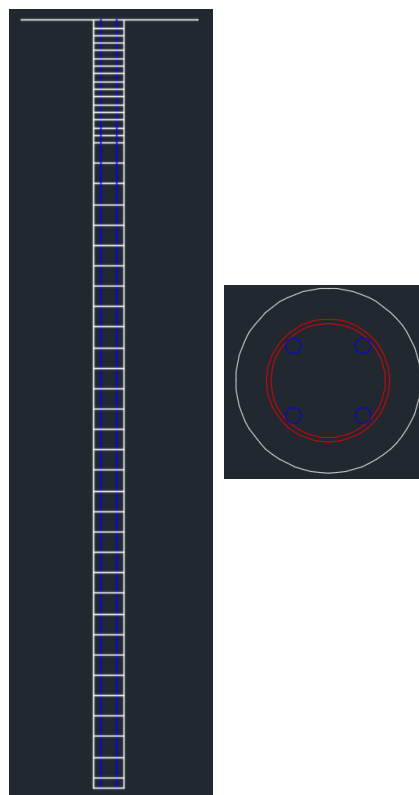


Ilustración 34. Distribución aproximada del refuerzo en los pilotes. Fuente Elaboración propia

La distribución de dados y pilote se muestra en la Ilustración 35. Distribución de dados y pilotes. Fuente: Elaboración propia.

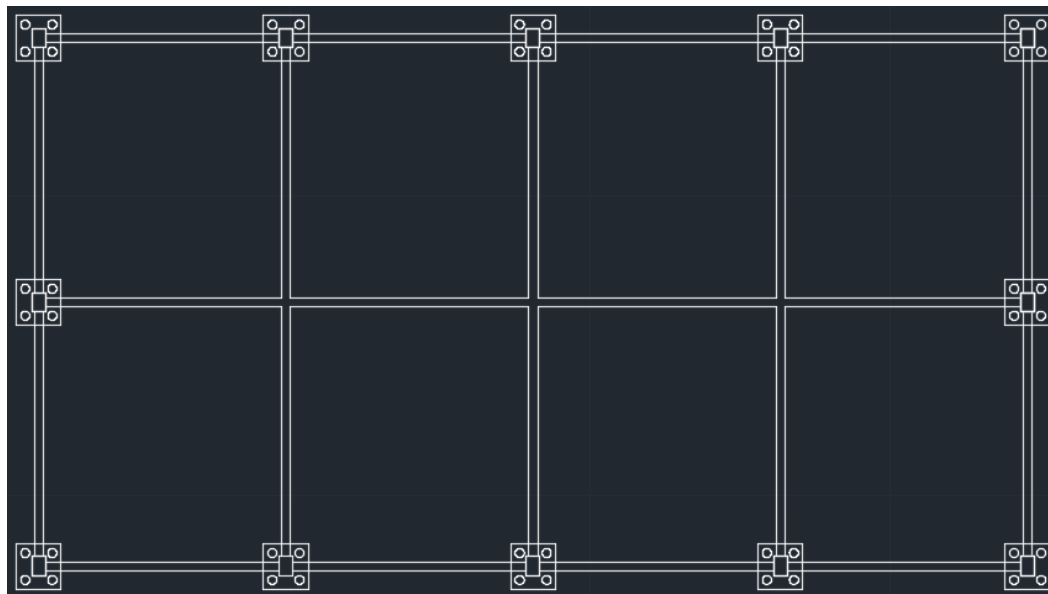


Ilustración 35. Distribución de dados y pilotes. Fuente: Elaboración propia

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

3.3.2 Pilotes metálicos:

El suelo presenta las siguientes características (ver Ilustración 36. Parámetros del suelo y profundidad de los pilotes metálicos. Fuente: Elaboración propia):

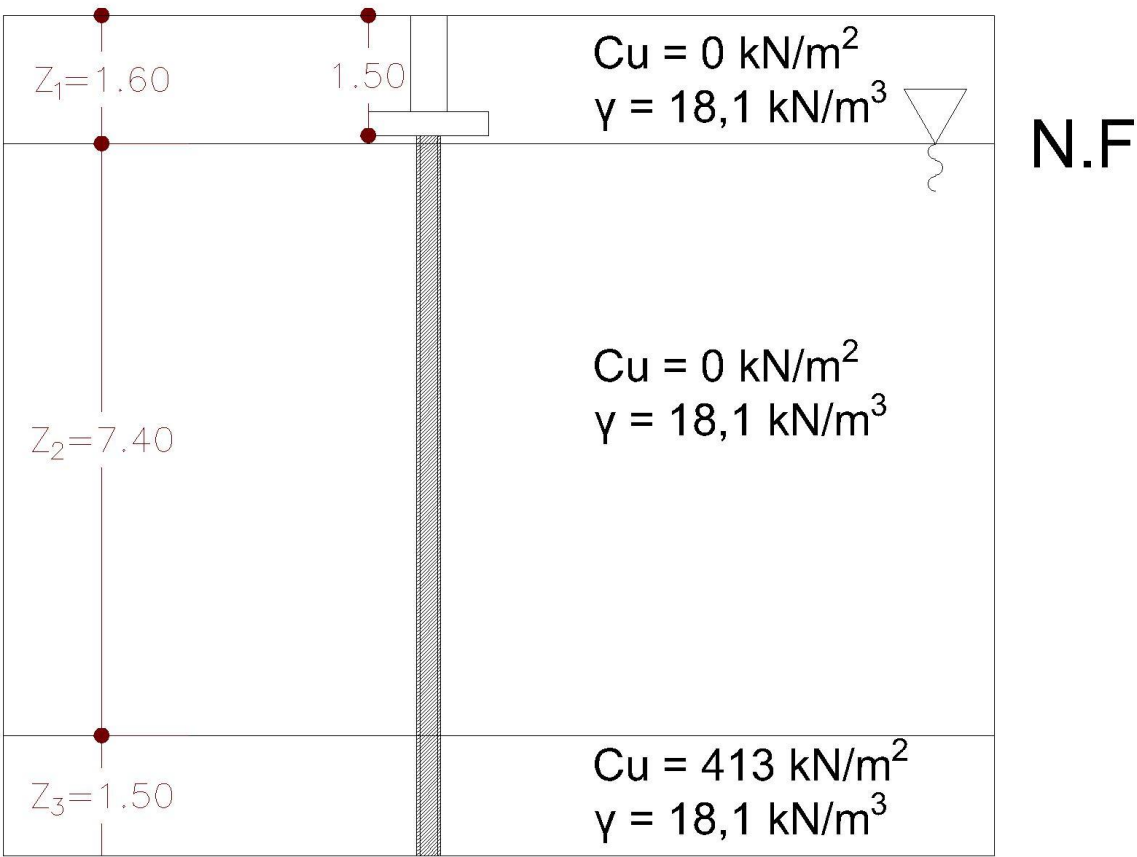


Ilustración 36. Parámetros del suelo y profundidad de los pilotes metálicos. Fuente: Elaboración propia

Para este diseño se selecciona el siguiente pilote:

Tabla 9. Perfil metálico seleccionado. Fuente:(Gerdau Corsa, n.d.)

IR	designación d x peso		W/H	Peralte	Alma	Patin		Distancia		Área
				d	tw	bf	tf	h	d' o T	
	mm x kg/m	in. x lb/ft.		mm	mm	mm	mm	mm	mm	
IR	203 x 46.2	8 x 31	H	203	7.2	203	11	181	156	58.9

Perímetro U	Eje X - X		Eje Y - Y		Área del Rectángulo	A's	Cestructural Carga Admisible	
	I	S	I	S			$(Q \cdot A's \cdot f_y) / 1.66$	
cm	cm ⁴	cm ³	cm ⁴	cm ³	cm ²	cm ²	kN	ton
119	4579	451	1544	152	412	41	854.08	87.06

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

La capacidad por punta se calcula como:

$$Q_p = \frac{N_c^* \cdot C_u \cdot A_p}{F.S}$$

$N_c^* = 9,0$ para arcillas

Se toma un factor de seguridad $F.S = 3,0$

$$A_p = 0,0412 \text{ m}^2$$

$$Q_p = \frac{9 \cdot 413 \text{ kN/m}^2 \cdot 0,0412 \text{ m}^2}{3,0}$$

$$Q_p = 51 \text{ kN}$$

La capacidad por fricción se calcula como:

$$Q_s = \frac{P_e \cdot L_p \cdot f}{F.S}$$

$$f = \lambda(\overline{\sigma'_0} + 2C_u)$$

Donde de la Tabla 4. Variación de λ con la longitud de empotramiento. Fuente: (Das, 2005)
Definimos un $\lambda = 0,245$.

Definimos un perfil de esfuerzos efectivos:

- Estrato 1: $\sigma'_{01} = \gamma_1 \cdot Z_1 = 28,96 \text{ kN/m}^2$
- Estrato 2: $\sigma'_{02} = \sigma_{01} + (\gamma_2 - 9,81 \text{ kN/m}^3) \cdot Z_2 = 90,31 \text{ kN/m}^2$
- Estrato 3: $\sigma'_{03} = \sigma_{02} + (\gamma_3 - 9,81 \text{ kN/m}^3) \cdot Z_3 = 103 \text{ kN/m}^2$

Por lo tanto el $\overline{\sigma'_0}$ esta dado por el valor promedio en el estrato donde se desarrolla la fricción es decir en el estrato 3

$$\overline{\sigma'_0} = \frac{\sigma'_{02} + \sigma'_{03}}{2} = 97 \text{ kN/m}^2$$

Por lo tanto:

$$f = 0,245 \cdot (97 \text{ kN/m}^2 + 2 \cdot 413 \text{ kN/m}^2) = 226 \text{ kN/m}^2$$

Se toma un factor de seguridad $F.S = 3,0$

$$Q_s = \frac{1,19 \text{ m} \cdot 1,5 \text{ m} \cdot 226 \text{ kN/m}^2}{3,0} = 134 \text{ kN}$$

La capacidad geotécnica del pilote está dada por:

$$Q_{neta} = Q_p + Q_s$$

$$Q_{neta} = 51 \text{ kN} + 134 \text{ kN} = 185 \text{ kN}$$

La norma permite un incremento de la capacidad geotécnica del pilote de hasta el 50% cuando se somete a cargas dinámicas.

$$Q_{neta_{din}} = 277 \text{ kN}$$

Por recomendación del manual de pilotes metálicos de Gerdau Corsa (2015) se realiza un predimensionamiento del cabezal con dos pilotes separados 1,0 m entre ejes. El dado está girado a 45° con respecto a la horizontal. Esto se hace con el fin de soportar los momentos en ambas direcciones. También se recomienda que la altura del cabezal sea mayor que la mitad de la separación entre pilotes. Por lo tanto $h = 0,5 \text{ m}$ y $d = 0,43 \text{ m}$.

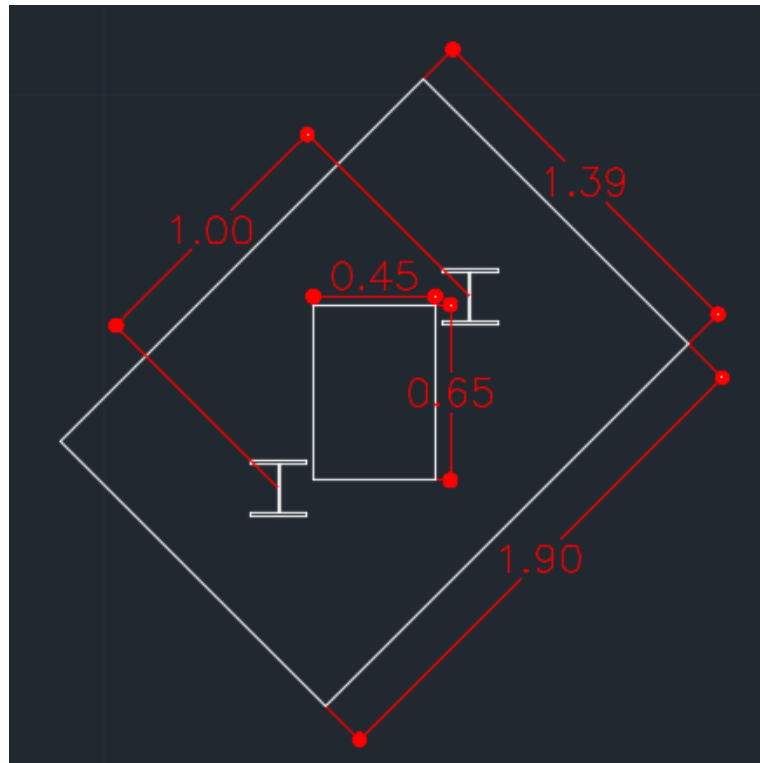


Ilustración 37. Predimensionamiento del dado con dos pilotes metálicos. Fuente: Elaboración propia

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

Se procede a calcular las cargas máximas a las que van a estar sometidos los pilotes como:

$$P_{max} = \frac{F_Y}{2} + \frac{M_X}{0,71\ m} + \frac{M_Z}{0,71\ m}$$

El 0,71 m corresponde al brazo de palanca ente el par de fuerzas equivalentes de cada momento (ver Ilustración 38. Brazos de palanca. Fuente: elaboración propia).

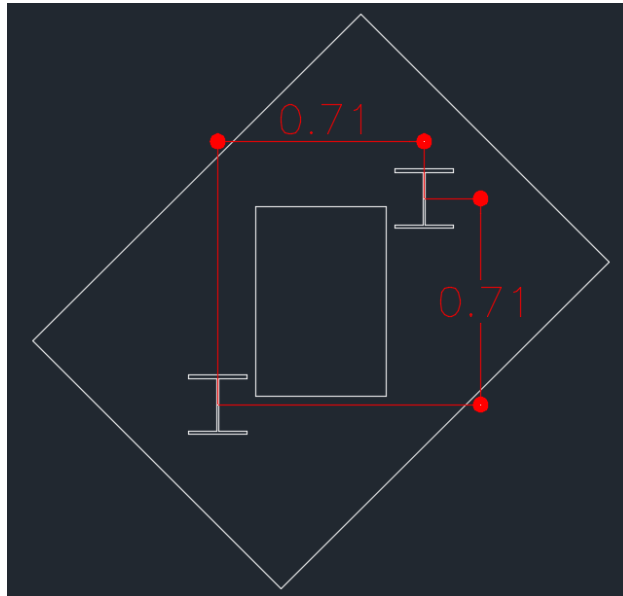


Ilustración 38. Brazos de palanca. Fuente: elaboración propia

Combinación 1:

$$P_{max} = \frac{146\ kN}{2} + \frac{66\ kN \cdot m}{0,71\ m} + \frac{5,7\ kN \cdot m}{0,71\ m} = 174\ kN < 185\ kN$$

Combinación 2:

$$P_{max} = \frac{128\ kN}{2} + \frac{61\ kN \cdot m}{0,71\ m} + \frac{29\ kN \cdot m}{0,71\ m} = 191\ kN < 277\ kN$$

Combinación 3:

$$P_{max} = \frac{145\ kN}{4} + \frac{71\ kN \cdot m}{0,71\ m} + \frac{5,2\ kN \cdot m}{0,71\ m} = 79\ kN < 277\ kN$$

Por lo tanto la distribución de pilotes es aceptable y se procede a realizar el diseño del dado.

- Chequeo de cortante bidireccional (punzonamiento)

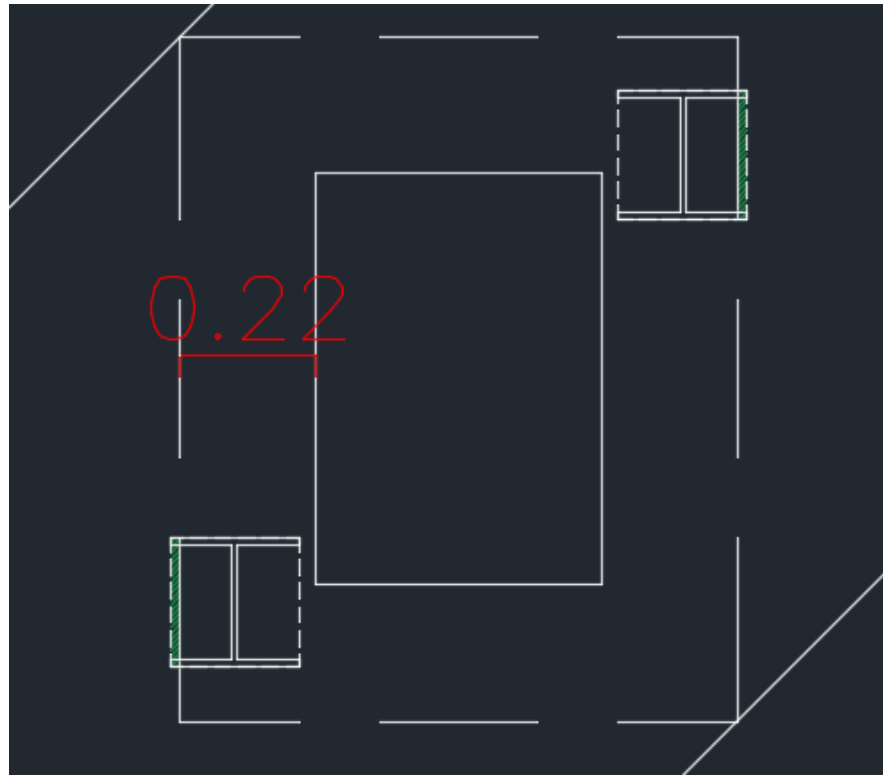


Ilustración 39. Área que aporta a la fuerza cortante. Fuente: Elaboración propia

El cortante aplicado al dado para la combinación de cargas más desfavorable es:

$$V_{bd} = \frac{219 \text{ kN}}{2} \times 7,5\% \times 2 = 17 \text{ kN} = 17000 \text{ N}$$

Donde 7,5% corresponde a la proporción de pilote que aporta al cortante bidireccional.

$$b_0 = 3920 \text{ mm}$$

$$d = 430 \text{ mm}$$

$$v_{bd} = \frac{V_{bd}}{b_0 \cdot d} = \frac{17000 \text{ N}}{3920 \text{ mm} \cdot 430 \text{ mm}} = 0,01 \text{ MPa}$$

Se debe cumplir que:

$$v_{bd} < \begin{cases} \phi_v \cdot 0,17 \cdot \left(1 + \frac{2}{\beta}\right) \cdot \lambda \cdot \sqrt{f'c} \\ \phi_v \cdot 0,083 \cdot \left(\frac{\alpha_s \cdot d}{b_0} + 2\right) \cdot \lambda \cdot \sqrt{f'c} \\ \phi_v \cdot 0,33 \cdot \lambda \cdot \sqrt{f'c} \end{cases}$$

Donde:

$$\phi_v = 0,75$$

$$\beta = b_1/b_2 = 0,65/0,45 = 1,44$$

$$\lambda = 1,0$$

$$f'c = 21 \text{ MPa}$$

$$\alpha_s = 40$$

$$0,01 \text{ MPa} < \begin{cases} 1,39 \text{ MPa} \\ 1,82 \text{ MPa} \\ 1,13 \text{ MPa} \end{cases} \quad \text{Cumple}$$

- Chequeo de cortante local (punzonamiento del pilote)

Se aplica el mismo procedimiento del chequeo anterior para el pilote más cargado.

En la Ilustración 40. Punzonamiento local. Fuente: Elaboración propia se muestra la zona donde se realiza el chequeo del punzonamiento local.

Combinación 4:

$$P_{max} = \frac{219 \text{ kN}}{2} + \frac{99 \text{ kN} \cdot \text{m}}{0,71 \text{ m}} + \frac{8,5 \text{ kN} \cdot \text{m}}{0,71 \text{ m}} = 261 \text{ kN}$$

Combinación 5:

$$P_{max} = \frac{192 \text{ kN}}{2} + \frac{92 \text{ kN} \cdot \text{m}}{0,71 \text{ m}} + \frac{44 \text{ kN} \cdot \text{m}}{0,71 \text{ m}} = 288 \text{ kN}$$

Combinación 6:

$$P_{max} = \frac{218 \text{ kN}}{2} + \frac{107 \text{ kN} \cdot \text{m}}{0,71 \text{ m}} + \frac{7,8 \text{ kN} \cdot \text{m}}{0,71 \text{ m}} = 271 \text{ kN}$$

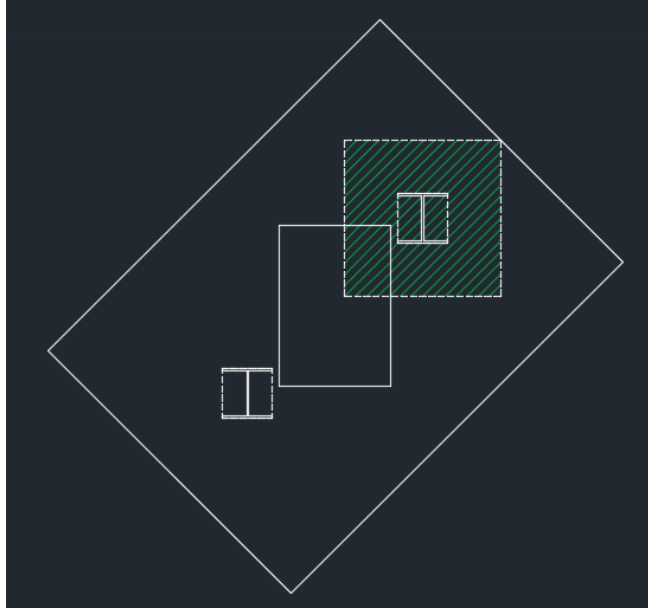


Ilustración 40. Punzonamiento local. Fuente: Elaboración propia

$$V_{bd} = 288 \text{ kN} = 288000 \text{ N}$$

$$b_0 = 2532 \text{ mm}$$

$$d = 430 \text{ mm}$$

$$v_{bd} = \frac{V_{bd}}{b_0 \cdot d} = \frac{288000 \text{ N}}{2532 \text{ mm} \cdot 430 \text{ mm}} = 0,26 \text{ MPa}$$

Se debe cumplir que:

$$v_{bd} < \begin{cases} \phi_v \cdot 0,17 \cdot \left(1 + \frac{2}{\beta}\right) \cdot \lambda \cdot \sqrt{f'c} \\ \phi_v \cdot 0,083 \cdot \left(\frac{\alpha_s \cdot d}{b_0} + 2\right) \cdot \lambda \cdot \sqrt{f'c} \\ \phi_v \cdot 0,33 \cdot \lambda \cdot \sqrt{f'c} \end{cases}$$

Donde:

$$\phi_v = 0,75$$

$$\beta = \frac{b_1}{b_2} = \frac{203 \text{ mm}}{203 \text{ mm}} = 1,0$$

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

$$\lambda = 1,0$$

$$f'c = 21 \text{ MPa}$$

$$\alpha_s = 40$$

$$0,26 \text{ MPa} < \begin{cases} 1,75 \text{ MPa} \\ 2,51 \text{ MPa} \\ 1,13 \text{ MPa} \end{cases} \quad \text{Cumple}$$

- Cortante unidireccional (acción de viga)

Este se mide a una distancia d (altura efectiva) del pedestal o la columna. Como se muestra en la Ilustración 41. Zona donde se genera el cortante unidireccional. Fuente: Elaboración propia la zona donde se debe realizar este chequeo no se intersecta con ningún pilote, por lo tanto la fuerza cortante (V_u) en esa zona es cero. Por esto no es necesario realizar este chequeo.

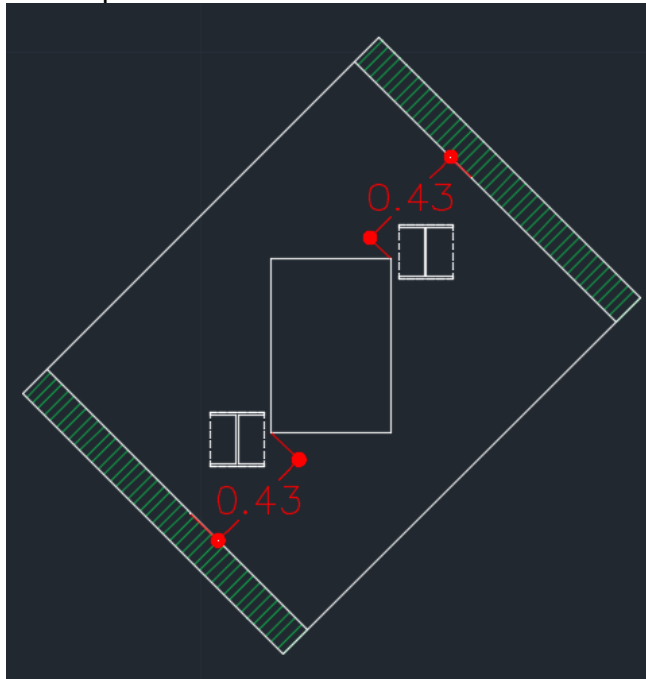


Ilustración 41. Zona donde se genera el cortante unidireccional. Fuente: Elaboración propia

- Momento y acero a flexión

El momento se calcula como:

$$M_u = V_u \cdot l$$

Donde l es la distancia desde el borde del pedestal hasta la línea ente ejes de pilotes (ver Ilustración 42. Zona donde se desarrolla en momento máximo. Fuente: Elaboración propia).

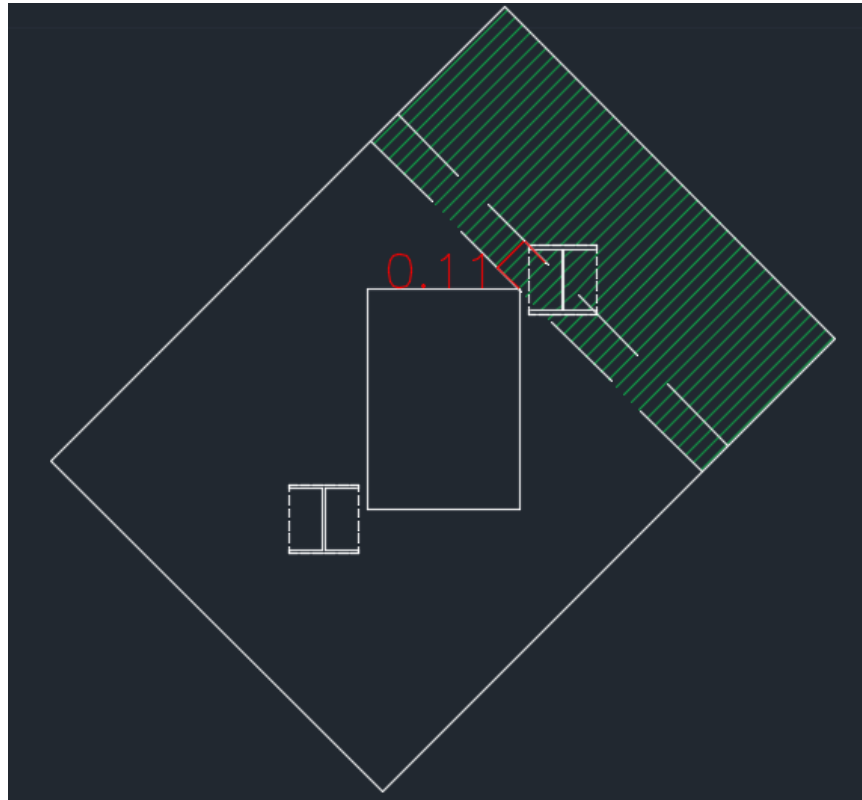


Ilustración 42. Zona donde se desarrolla en momento máximo. Fuente: Elaboración propia

$$V_u = 288 \text{ kN}$$

$$l = 0,11 \text{ m}$$

$$M_u = 31,7 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

Si se pone el acero por temperatura, es decir una cuantía de $\rho_{min} = 0,0018$ El momento resistente es igual a:

$$\phi Mn = 171,2 \text{ kN} \cdot \text{m} > 31,7 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

Por lo tanto el área de acero requerida en la cara superior e inferior en la dirección del momento es:

$$A_s = 1076 \text{ mm}^2$$

Que corresponde a 9 estribos N°4 (Estribo 1). La longitud aproximada es de 4,5 m

En el sentido perpendicular a la dirección del momento se aplica también la cuantía por temperatura:

$$A_s = 1471 \text{ mm}^2$$

Que corresponde a 12 estribos N°4 (Estribo 2). La longitud aproximada es de 3,5 m

Se dispone un estribo intermedio que amarre todo el dado (Estribo 3). La longitud aproximada es de 6,3 m

La composición del armazón debe formar un cajón como se muestra en la Ilustración 43. Refuerzo de los dados con dos pilotes.

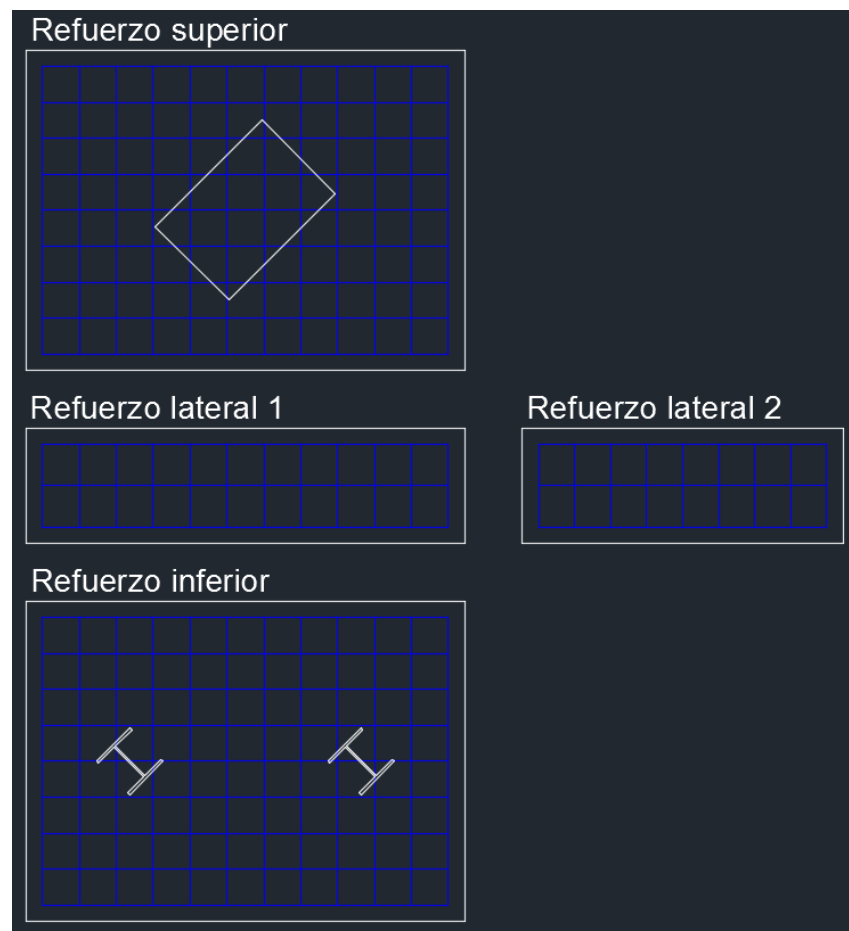


Ilustración 43. Refuerzo de los dados con dos pilotes. Fuente: Elaboración propia

El detalle de los estribos se muestra en la Ilustración 44. Detalle de estribos. Fuente: Elaboración propia.

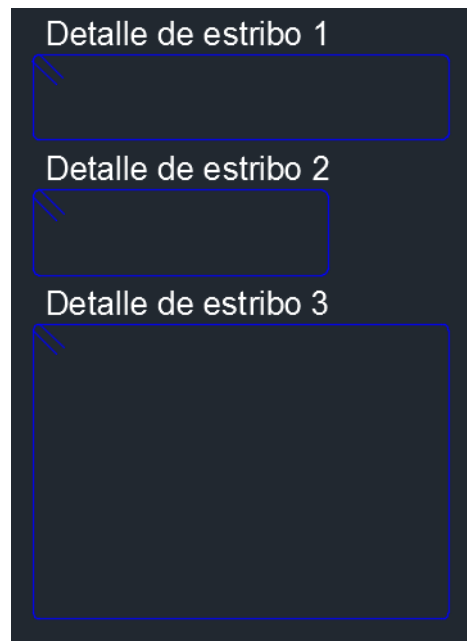


Ilustración 44. Detalle de estribos. Fuente: Elaboración propia

Por recomendación del manual de pilotes metálicos de Gerdau Corsa (2015), se sugiere que el pilote metálico se ancle 30 cm en el dado y tenga estribos que confinen el concreto como lo muestra la Ilustración 45. Detalle de anclaje del pilote al dado. Fuente: Elaboración propia. Los estribos corresponden a 4 N°3 de longitud 0,85 m.

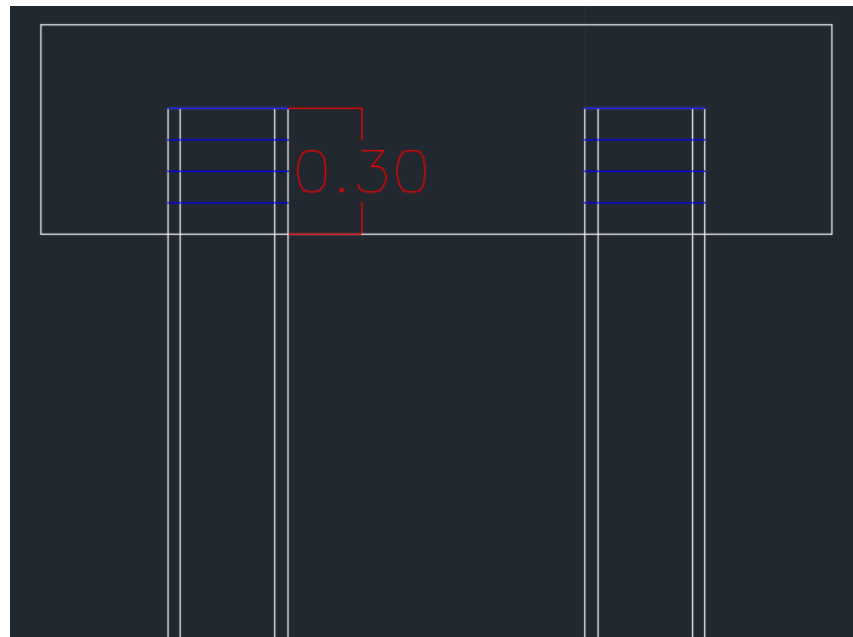


Ilustración 45. Detalle de anclaje del pilote al dado. Fuente: Elaboración propia

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

La distribución de dados y pilotes metálicos se muestra en la Ilustración 46. Distribución de dados y pilotes metálicos. Fuente: Elaboración propia.

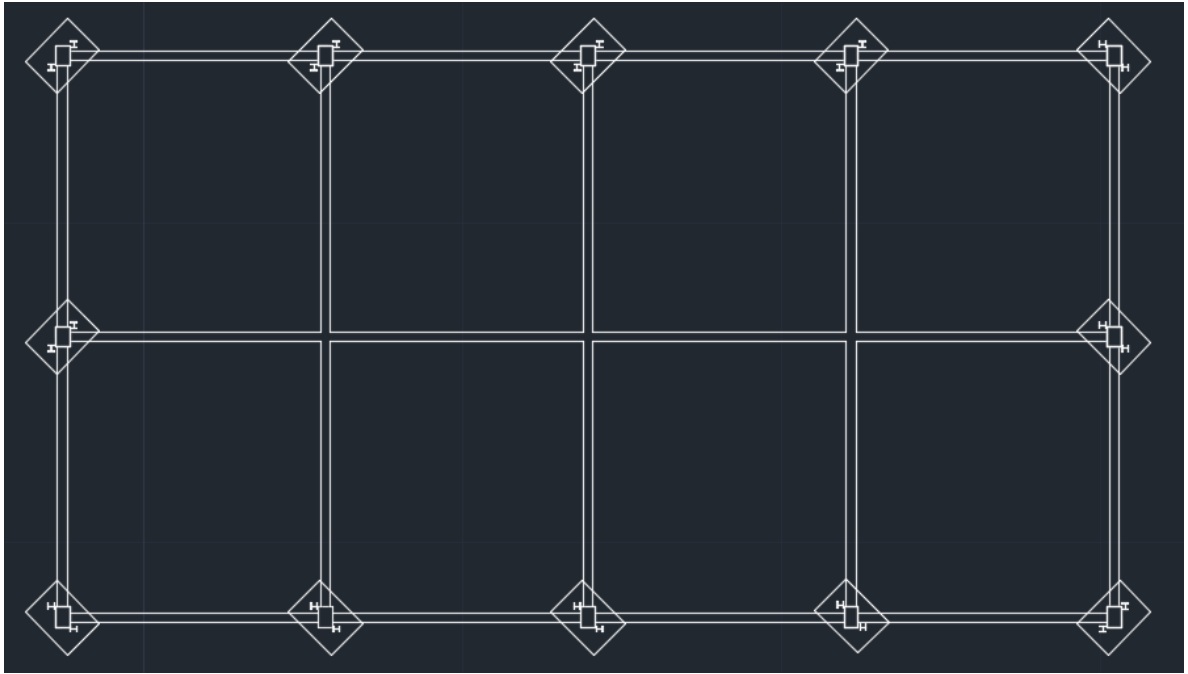


Ilustración 46. Distribución de dados y pilotes metálicos. Fuente: Elaboración propia

3.4 CÁLCULO DE COSTOS APROXIMADOS

El costo total de la cimentación de una estructura está determinado por ítems como:

- Costo de los materiales
- Mano de obra
- Transporte
- Maquinaria

El ingeniero Juan Esteban Londoño (2015) menciona que la mano de obra y la maquinaria usada para instalar el sistema de pilotes de concreto sirven de la misma manera para el sistema de pilotes metálicos. Por lo tanto, no se tendrán en cuenta estos ítems en el cálculo de costos.

Para el caso de estudio, donde la cantidad de pilotes y de material es pequeña en comparación con obras de grandes proporciones, el transporte tiende a ser un valor poco determinante a la hora de determinar las diferencias en los costos totales, por esto, se desprecia este ítem.

Con el fin de simplificar el problema, se toman solo los costos de los materiales ya puestos en obra. La razón es que la diferencia en los valores totales de los dos sistemas radica en las cantidades y el valor de los insumos necesarios para cada sistema.

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

- Valores unitarios aproximados:

Estos valores son aproximados y se sacaron de acuerdo a consultas realizadas a personas del medio de la construcción. Estos incluyen materiales e instalación. La magnitud de estos costos puede variar de acuerdo a factores como:

- Precio del dólar
- Lugar del proyecto
- Tiempo (año o mes)
- Proveedor
- Escases de materiales

Por lo anterior se puede entender que estos costos son ficticios. Para fines prácticos y académicos sirven para realizar una comparación sobre la proporción entre el costo de un sistema con respecto al otro.

Concreto (\$/m ³)	Acero de refuerzo (\$/kg)	Perfiles de acero (\$/kg)
330.000	2.000	2.200

3.4.1 Cimentación con pilotes de concreto

- Cantidades de obra:

Concreto			
	Volumen (m ³)	Numero	Volumen total (m ³)
Pilote	0,53	48	25,45
Dado	0,83	12	9,99
Total			35,44

Acero de refuerzo				
	Longitud (m)	Masa (kg/m)	Numero	Masa total (kg)
Pilote				
N°3	29,14	0,560	48	783,28
N°4	30,00	0,994	48	1.431,36
Dado				
N°4	49,00	0,994	12	584,47
Total				2.799,12

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

- Valor total aproximado:

Concreto	\$	11.694.177
Acero de refuerzo	\$	5.598.230
Perfiles de acero	\$	-
Total	\$	17.292.408

3.4.2 Cimentación con pilotes metálicos

- Cantidades de obra:

Concreto			
	Volumen (m³)	Numero	Volumen total (m³)
Dado	1,32	12	15,85
Total			15,85

Perfiles de acero				
	Longitud (m)	Masa (kg/m)	Numero	Masa total (kg)
Pilote	9,3	46,2	24	10.311,84
Total				10.311,84

Acero de refuerzo				
	Longitud (m)	Masa (kg/m)	Numero	Masa total (kg)
Pilote				
N°3	3,40	0,560	24	45,70
Dado				
N°4	88,80	0,994	12	1.059,21
Total				1.104,90

- Valor total aproximado:

Concreto	\$	5.229.180
Acero de refuerzo	\$	2.209.805
Perfiles de acero	\$	22.686.048
Total	\$	30.125.033

4. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

- Ejemplos ilustrativos

Sin tener en cuenta el caso de estudio de este trabajo, se decide realizar un análisis desde el diseño, de los factores y las variables que generan diferencias entre un material u otro a la hora de los cálculos. Por esto se realizó un análisis de las capacidades de carga de dos pilotes en dos tipos de suelo diferentes. Para tener un punto de comparación se seleccionan los pilotes de tal manera que el perímetro de ambos sea igual.

Para el primer ejemplo (pilotes en arena) a pesar de tener perímetros iguales, la capacidad de carga por fricción del pilote metálico es aproximadamente 0,75 veces la capacidad del pilote de concreto. Esta diferencia radica en el contacto entre el suelo y el material, donde el concreto desarrolla mayor fricción que el acero por su rugosidad.

Con respecto a la capacidad por punta, el área de la superficie de contacto en los pilotes de concreto es mayor que el área en los pilotes metálicos, por lo que la capacidad por punta es mucho menor en el perfil de acero.

Para el segundo ejemplo (pilotes en arcilla) las diferencias entre los dos materiales son menores. Según las variables que se tienen en cuenta para el cálculo de las capacidades de carga tanto por punta como por fricción, no hay ningún factor que involucre el material del pilote (como si lo hay en la capacidad de carga por fricción en arenas); todas las variables dependen de las características propias del suelo, como su cohesión y su densidad. Por lo tanto, dado que los pilotes presentaban el mismo perímetro y la misma profundidad, la capacidad por fricción es igual para ambos casos.

Al igual que en el ejemplo en arenas, la capacidad por punta de los pilotes metálicos es menor debido a la superficie de contacto.

Si se analiza el peso propio de ambos pilotes, dado que los perfiles de acero son mucho más livianos que los cilindros de concreto, en las arcillas se compensa la pérdida de la capacidad de carga por punta en los pilotes metálicos con su peso propio, por lo cual hace que ambos pilotes tengan aproximadamente la misma capacidad geotécnica.

En estos ejemplos ilustrativos solo se aprecian diferencias técnicas entre los dos materiales desde el punto de vista de los diseños.

- Caso de estudio

En el caso de estudio se presentan condiciones donde se permite aprovechar una de las principales ventajas de los pilotes metálicos. El estrato de suelo que resistirá los pilotes posee altas propiedades mecánicas, tanto así, que a los pilotes de concreto no se les puede garantizar su integridad si atravesasen este estrato, ya que en el proceso del hincado se golpea el extremo de estos pilotes provocando posibles fallas o daños en el material.

Los pilotes metálicos, debido a su facilidad en el hincado (por tener una sección transversal pequeña) y por poseer una alta resistencia mecánica, garantiza atravesar estos estratos sin

afectar su integridad. Por lo tanto tienen una ventaja importante ya que no solo llegan a suelos mejores, lo que permite tener mayor capacidad por punta, sino que también puede desarrollar capacidad por fricción en el estrato atravesado.

Para este caso de estudio se procuró optimizar los diseños de la mejor manera aprovechando lo mayor posible las ventajas de cada uno de los materiales. Cabe resaltar que debido a la gran cantidad de incertidumbres con respecto al suelo y los materiales, se asumió una postura conservadora, tomando los valores más críticos de los parámetros del estudio de suelos. Por esto es posible que en la realidad, los pilotes se comporte mejor que para lo que están diseñados.

En el diseño con pilotes de concreto, fueron necesarios cuatro pilotes por columna apoyados en el estrato firme (a nueve metros de profundidad). Gracias a que los pilotes metálicos tienen mayor capacidad geotécnica sacrificando 1,5 metros de más por pilote, se logran hacer distribuciones de dados de tal forma que cada columna esta soportada por un dado con dos pilotes metálicos.

- Costos

A pesar de que el número de pilotes metálicos es la mitad que los de concreto, y que se seleccionó un perfil relativamente liviano, se evidencia que el costo del material es muy elevado. Lo que hace que el sistema con pilotes metálicos sea aproximadamente 1,75 veces más costoso que el otro sistema.

Otro factor que influye es la cantidad de concreto necesaria en los dados, ya que el sistema con pilotes de acero exige mayores alturas de los dados y mayores espaciamientos entre pilotes, por lo tanto mayor volumen de concreto y mayor longitud de acero de refuerzo.

5. CONCLUSIONES Y CONSIDERACIONES FINALES

Teniendo presente que el alcance de este proyecto es el caso de estudio (la bodega de Forjas Bolívar S.A.S), se puede concluir:

- A pesar de contar con un estudio de suelos y con formulaciones que permiten el cálculo de los parámetros de diseño, aún existen muchas incertidumbres que no permiten optimizar de la mejor manera los diseños; es imposible garantizar que el suelo posea las mismas características en toda el área del proyecto, por lo tanto se deben asumir los valores más críticos con el fin de estar confiados en que la estructura sea segura. Esto implica que la estructura siempre este sobre-diseñada por lo tanto, los diseños siempre tendrán un costo mayor al óptimo.
- La bodega es liviana (estructura de acero) por lo que las cargas terminan siendo fáciles de controlar en la cimentación, esto permite que sea un caso de estudio ideal para comparar ambos sistemas ya que no posee características especiales donde se beneficie el uso de un sistema con respecto a otro.
- Sin tener en cuenta el costo de los materiales, ambos sistemas terminan teniendo costos muy similares de construcción ya que los dos requieren la misma mano de obra y la misma maquinaria. El único ítem donde se ve beneficiado el sistema de cimentación con acero es en el transporte ya que se necesitan menos viajes para llevar los perfiles al lugar de destino; sin embargo, la diferencia es insignificante con respecto al costo total de las cimentaciones.
- La cimentación con perfiles de acero es técnicamente viable, posee una ventaja grande con respecto a los pilotes de concreto y es la capacidad de llegar a estratos del suelo más resistentes garantizando la integridad del perfil. Esto permite obtener una capacidad geotécnica más grande por lo que requiere de menor número de pilotes por columna.
- A pesar de que para estos diseños se utilizaron formulas comúnmente usadas en el medio, siempre va a existir la incertidumbre de si estar formulas son correctas, y si el comportamiento del pilote será aproximado a los cálculos realizados. Tanto para el sistema con pilotes de concreto como para los pilotes metálicos es recomendable hacer ensayos de campo que permitan analizar el comportamiento de los elementos con el fin de garantizar la seguridad del proyecto.
- Debido a que el uso de pilotes metálicos no es usual en el medio de la ingeniería colombiana, antes de aplicar su uso en algún proyecto, se sugiere realizar estudios de comportamiento de estos pilotes para obtener mayor confiabilidad en las capacidades de carga de acuerdo al tipo de suelo donde se utilizarán.
- Se concluye para este caso de estudio que aunque el sistema de pilotes metálicos sea técnicamente viable desde el diseño, es económicamente inviable teniendo en cuenta el costo del material, porque a pesar de necesitar menos cantidad de pilotes, esos siguen siendo costosos con respecto al sistema convencional de pilotes de concreto. Y si se tiene en cuenta las incertidumbres en su comportamiento, no se

ve razonable pagar un mayor precio por un sistema que no genera más confiabilidad.

- Las conclusiones obtenidas en este trabajo se deben a las condiciones propias del proyecto, se pueden presentar proyectos con condiciones tal que el uso de pilotes metálicos tenga mayores beneficios que compensen la diferencia económica entre los materiales.

BIBLIOGRAFÍA

- Blight, G., & Leong, E.-C. (2012). *Mechanics of Residual Soils. Second Edition*. CRC Press.
- Garza Vasquez, L. (2000). *DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE CIMENTACIONES*. Medellín: Universidad Nacional de Colombia. Obtenido de http://www.docentes.unal.edu.co/lgarza/docs/NOTAS_%20DYCC_%20v09-10-06.pdf
- Garza Vasquez, L. (2007). *DISEÑO DE ESTRUCTURAS DE CIMENTACIÓN DE ACUERDO A NSR-10*. Medellín: Facultad de Minas de la Universidad Nacional de Colombia.
- Garza Vázquez, L. (4 de Febrero de 2015). Entrevista sobre viabilidad del proyecto de pilotes de acero en Colombia. (J. Betancur Rivera, Entrevistador)
- HISTAR. (2014). Pilotes de Acero HP. Pilotes de Alta Resistencia. España.
- rueda, J. I. (10 de enero de 2006). *Propiedades mecánicas de los metales*. Obtenido de www.joseluismesarueda.com: http://www.joseluismesarueda.com/documents/TEMA_6_001.pdf
- Salas, C. (2012). *Técnicas en la Construcción*. Obtenido de http://tecnicasenlaconstruccion.weebly.com/uploads/1/3/6/6/13669342/clase_1p_cimentaciones_profundas_19y21sep.pdf
- aceros DIACO, G. (n.d.). PERFILES ESTRUCTURALES LAMINADOS VIGAS W.pdf.
- Bowles, J. E. (1997). *Foundation Analysis and Design Fifth Edition. Engineering Geology* (Vol. 20). [http://doi.org/10.1016/0013-7952\(84\)90010-3](http://doi.org/10.1016/0013-7952(84)90010-3)
- Coruña, U. da. (2010). Estructuras Metálicas e Construcción Mixta.
- Das, B. M. (2001). *Principios de Ingeniería de Cimentaciones* (4ta Edición).
- Das, B. M. (2005). *Fundamentos De Ingeniería De Cimentaciones*.
- Delgado Vargas, M. (1996). *INGENIERÍA DE FUNDACIONES. Fundamentos e introducción al análisis geotécnico*. (E. E. C. de Ingeniería, Ed.). Bogotá.
- Forjas Bolívar. (n.d.).
- Garza Vásquez, L. (2000). *Diseño y Construcción de Cimentaciones*. Medellín. Retrieved from http://www.docentes.unal.edu.co/lgarza/docs/NOTAS_DYCC_v09-10-06.pdf
- Gerdau, E. M. (2015). Estacas metálicas gerdau, 8va Edición.
- Gerdau Corsa. (n.d.). MANUAL DE PILOTES METÁLICOS.

Gerdau Corsa. (2015). Estudio de Factibilidad de Pilotes de Acero de Sección IR en México / Informe Académico.

ISO-12944-5. (2002). Recomendaciones pinturas, 2002.

Londoño, J. E. (2015). *Entrevista sobre el uso de pilotes en Antioquia*.

NSR-10. (2010). Norma Sismoresistente 2010.